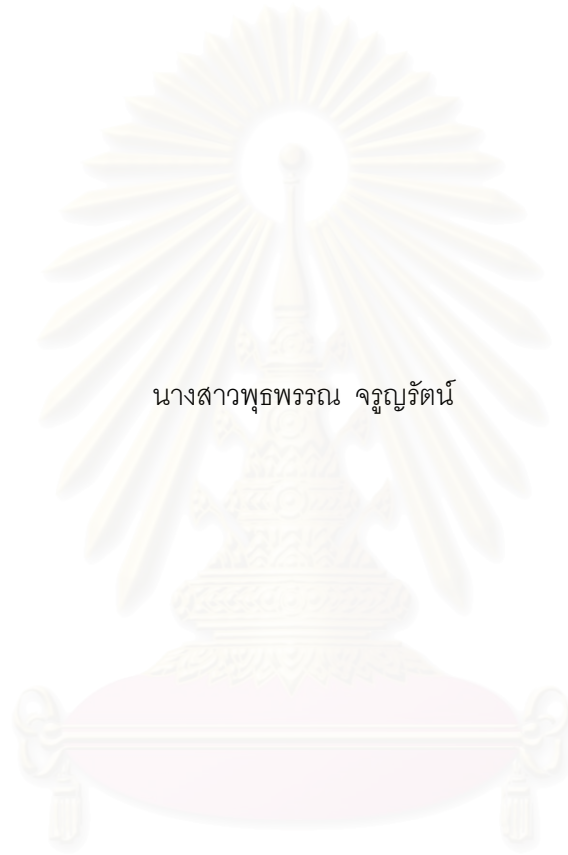


ผลของคลื่นเหนือเสียงต่อการกรองระดับจุลภาคในเครื่องกรองแบบหมุน



นางสาวพุทธพรรณ จรุงรัตน์

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-13-0592-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF THE ULTRASONIC WAVE ON MICROFILTRATION
IN A ROTATING FILTER



Miss Phutphan Charoonrat

สถาบันวิทยบริการ
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2000

ISBN 974-13-0592-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของคลื่นเหนือเสียงต่อการกรองระดับจุลภาคในเครื่องกรองแบบหมุน
โดย	นางสาวพุดพรรณ จรุงรัตน์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. หทัยชนก ดุริยะบรรเลง
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร. จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. วิวัฒน์ ตันทะพานิชกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. หทัยชนก ดุริยะบรรเลง)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร. จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์)

พุทธพรณ จรุงรัตน์ : ผลของคลื่นเหนือเสียงต่อการกรองระดับจุลภาคในเครื่องกรองแบบหมุน (EFFECTS OF THE ULTRASONIC WAVE ON MICROFILTRATION IN A ROTATING FILTER) อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ดร. ทัชชชนก ดุริยะบรรเลง, อ.ที่ปรึกษาร่วม : รศ.ดร.จिरกานต์ เมืองนาโพธิ์ จำนวนหน้า 216 หน้า. ISBN 974-13-0592-3.

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้คลื่นเหนือเสียงในการกรองระดับจุลภาคสำหรับเครื่องกรองแบบทอที่มีการหมุนของเยื่อแผ่น มีวัตถุประสงค์เพื่อลดอัตราการสะสมของอนุภาคบนผิวเยื่อแผ่นตลอดทั้งเยื่อแผ่นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกรองให้มากขึ้นโดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มจำนวนตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง คลื่นเหนือเสียงสามารถลดค่าความต้านทานการกรองของเค้กลงได้โดยปรากฏการณ์ควิเทชันและการการปั่นป่วนภายในของเหลว ซึ่งสามารถกำจัดอนุภาคที่สะสมบนผิวเยื่อแผ่นได้ในบริเวณพื้นที่ของเยื่อแผ่นที่สัมผัสกับคลื่นเหนือเสียง เพื่อให้คลื่นเหนือเสียงสามารถสัมผัสพื้นที่ทั้งหมดของการกรองโดยใช้จำนวนตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงน้อยที่สุดเพื่อลดการใช้พลังงาน งานวิจัยนี้จึงทำการทดลองหมุนเยื่อแผ่นเซรามิคและติดตั้งตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง 1 ตัวบนผนังท่อทรงกระบอกด้านนอกเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อฟลักซ์การกรองของเครื่องกรองแบบหมุนร่วมกับการใช้คลื่นเหนือเสียงนั่นคือสภาวะของการทดลอง คือ ใช้สารละลายยีสต์ในการกรองที่ความเร็วสายป้อน 0.06 เมตรต่อวินาที ความเข้มข้นของสารละลายยีสต์ 5, 10 และ 20 กรัมต่อลิตร ความดันคร่อมเยื่อแผ่น 0.22, 0.35 และ 0.46 บาร์ ความเข้มของคลื่นเหนือเสียง 0.44, 1.76 และ 3.09 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ความเร็วรอบในการหมุนของเยื่อแผ่น 0-100 รอบต่อนาที

สำหรับระบบและสภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้ไม่มีการเกิดการหมุนวนของสารละลายของเทย์เลอร์อันเป็นสาเหตุให้เกิดแรงเฉือนกระทำต่อชั้นเค้กเป็นผลให้ฟลักซ์การกรองเพิ่มขึ้น ผลการวิจัยในการใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมกับการกรองแบบทอหมุนพบว่าความเร็วรอบการหมุนไม่มีผลต่อค่าฟลักซ์การกรองที่สภาวะคงที่มากนักโดยจะมีค่าฟลักซ์เพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการหมุนของเยื่อแผ่น ที่ความเข้มข้นของสายป้อนน้อยคลื่นเหนือเสียงจะช่วยให้ฟลักซ์การกรองเพิ่มขึ้นมากกว่าที่ความเข้มข้นของสายป้อนมาก ความเข้มของคลื่นเหนือเสียงเพิ่มขึ้นมีผลในการเพิ่มความรุนแรงของควิเทชันในการกำจัดอนุภาคบนผิวเยื่อแผ่นส่งผลให้ฟลักซ์การกรองเพิ่มขึ้น การเพิ่มความดันคร่อมเยื่อแผ่นมีผลให้ค่าฟลักซ์การกรองร่วมกับการใช้คลื่นเหนือเสียงเพิ่มขึ้น จากการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมของการกรองที่มีการใช้คลื่นเหนือเสียงและมีการหมุนของเยื่อแผ่น คือ ที่ความเข้มของคลื่นเหนือเสียง 3.09 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ความเข้มของสายป้อน 10 กรัมต่อลิตร ความดันคร่อมเยื่อแผ่น 0.46 บาร์ ความเร็วรอบในการหมุน 5-100 รอบต่อนาที ซึ่งจะได้ฟลักซ์การกรองเพิ่มขึ้น 3-5 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียงและไม่มีการหมุนของเยื่อแผ่น สำหรับความเข้มของคลื่นเหนือเสียงในช่วงที่ทำการทดลองไม่ส่งผลต่อค่าการเก็บกักของเยื่อแผ่นและคุณลักษณะของยีสต์

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2543..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4070360521 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD : ULTRASOUND / MICROFILTRATION / ROTATING FILTER

PHUTPHAN CHAROONRAT: EFFECTS OF THE ULTRASONIC WAVE ON MICROFILTRATION IN A ROTATING FILTER. THESIS ADVISOR : ASSIST.PROF. HATHAICHANOK DURIYABUNLENG, Ph.D. THESIS COADVISOR : ASSOC. PROF.CHIRAKARN MUANGNAPOH, Dr.Ing., 216 pp. ISBN 974-13-0592-3.

This present research is an application of ultrasound in the rotating filter micorfiltration system. The objective of this work is to reduce the rate of agglomeration of filtered particles on the membrane surface thoroughly in order to enhance the filtration efficiency without an increase of the number of the ultrasonic transducers. Ultrasound is pronounced by the reduction of the filtration resistance with the phenomenon called the cavitation and the turbulent movement of the fluid. These phenomenon have resulted in the removal of the particles deposited on the membrane surface within the area of which is radiated by ultrasound. To optimize the number of the ultrasonic transducers used to cover the whole area of the membrane surface, the rotating filter coupling with an ultrasonic transducer on the outside cylindrical wall is thus implemented. The factors affecting the filtration flux of the rotating filter system with ultrasound have been studied i.e. the baker's yeast solution 5, 10 and 20 g/l, the transmembrane pressure 0.22, 0.35 and 0.46 bar, the ultrasonic intensity 0.44, 1.76 and 3.09 w/cm², the rotation speed 0-100 rpm.

It has been found that in this system there is no effect from the shear force caused by the Taylor vortice of which would reduce the cake formation and consequently an increase of the flux. The experimental results have shown that the rotation speed has also no effect on the steady-state flux. It is also found that under ultrasonic irradiation the filtration flux is increased by 2 times with the rotating filter compared with the case without the rotation. The less the feed concentration, the more the effect of the ultrasonic on the flux. An increase of the ultrasonic intensity affects on the increase of the effect of the cavitation in the removal of the particles deposited on the membrane. An increase of the transmembrane pressure also enhances the flux under an ultrasonic irradiation. From the experimental results, it is found that the optimum condition is at an ultrasonic intensity 3.09 W/cm², the feed concentration 10 g/l, the transmembrane pressure 0.46 bar, the speed rotation of 5-100 rpm, the flux can be increased by 3-5 times when compared with the case without ultrasonic and rotation. In the range of the studied ultrasonic intensity, the effects of ultrasonic on the percent rejection of the membrane and the characteristics of yeast have not found.

Department.....Chemical Engineering..... Student's signature.....

Field of study...Chemical Engineering Advisor's signature

Academic year.....2000..... Co-advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากหลายๆท่าน ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หทัยชนก ดุริยะบรรเลง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำแนะนำในการดำเนินงานวิจัยและความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล ประธานกรรมการ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ข้อแนะนำที่เป็นประโยชน์ ตลอดจนตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจาก ทุนผู้ช่วยวิจัยโครงการเมธีวิจัยอาวุโส ศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล – สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ทุนอุดหนุนการวิจัยของบัณฑิตวิทยาลัย ทุนวิจัยคณะวิศวกรรมศาสตร์ จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่อนุเคราะห์ให้ยืมเครื่องมือทางไฟฟ้า, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่ให้ความช่วยเหลือในการกลึงและเจาะอุปกรณ์

ขอขอบคุณ คุณจิตติวุฒิ เพชรมณี ที่ให้ความช่วยเหลือในการถ่ายภาพ ตลอดจนคำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างสูง

ขอขอบคุณ คุณปาริฉัตร ร่องใสภา ที่ให้ความช่วยเหลือในการจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์ และคอยเป็นกำลังใจตลอดมา และ คุณนพพร กุลไชย ที่ให้ความช่วยเหลือในการเขียนแบบ

ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีอนาคต และห้องปฏิบัติการวิจัยวิศวกรรมชีวเคมี ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำงานวิจัยและทำให้ชีวิตมีสีสัน

ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และบุคคลในครอบครัว ที่ให้ความรัก กำลังใจ และทุกๆอย่างตลอดมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฌ
สารบัญรูป	ญ
สัญลักษณ์	ฎ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
3 ทฤษฎีเกี่ยวกับการกรอง	7
3.1 การกรองระดับอนุภาคแบบไหลขนาน	8
3.1.1 อิทธิพลที่ส่งผลกระทบต่อฟลักซ์การกรอง	9
3.1.2 ค่าความสามารถในการเก็บกักของเยื่อแผ่น	11
3.2 เครื่องกรองระดับอนุภาคชนิดต่างๆ	11
3.3 เครื่องกรองระดับอนุภาคแบบท่อหมุน	12
4 ทฤษฎีเกี่ยวกับคลื่นเหนือเสียง	16
4.1 ปรัชญาการเคลื่อนที่ของคลื่นเหนือเสียงในตัวกลาง	16
4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อความยากง่ายในการเกิดควาวิเทชัน	18
4.3 ตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง	22
5 อุปกรณ์และวิธีการวิจัย	27
5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	27
5.2 สารเคมี	28
5.3 ระบบและเครื่องกรองแบบหมุนที่มีการติดตั้งตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง	28
5.4 วิธีการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อฟลักซ์การกรอง	33

	หน้า
5.4.1 ขั้นตอนการทดลอง	33
5.4.2 สภาวะที่ใช้ในการทดลอง	35
5.4.3 การศึกษาปรากฏการณ์คาวิตีชัน	35
5.5 วิธีการศึกษาผลของคลื่นเหนือเสียงต่อเยื่อแผ่น	37
5.6 วิธีการศึกษาผลของคลื่นเหนือเสียงต่อยีสต์	39
6 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	40
6.1 ผลของปัจจัยต่างๆที่มีต่อฟลักซ์การกรอง	48
6.1.1 ความเร็วรอบในการหมุนของเยื่อแผ่น	48
6.1.2 ความเข้มข้นของสายป้อน	70
6.1.3 ความเข้มของคลื่นเหนือเสียง	75
6.1.4 ความดันคร่อมเยื่อแผ่น	82
6.1.5 ความสามารถในการเก็บกักของเยื่อแผ่น	85
6.2 ผลของคลื่นเหนือเสียงต่อเยื่อแผ่น	86
6.3 ผลของคลื่นเหนือเสียงต่อยีสต์	91
6.4 วิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์	96
7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะในการวิจัยเพิ่มเติม	101
7.1 สรุปผลการวิจัย	101
7.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยเพิ่มเติม	102
รายการอ้างอิง	104
ภาคผนวก	106
ภาคผนวก ก แบบเครื่องกรองแบบหมุน.....	107
ภาคผนวก ข การคำนวณค่าความต้านทานการกรอง.....	114
ภาคผนวก ค กราฟมาตรฐานความเข้มข้นยีสต์	117
ภาคผนวก ง ผลการวัดขนาดรูพรุนของเยื่อแผ่น	119
ภาคผนวก จ ผลการวัดการกระจายขนาดของอนุภาคยีสต์	126
ภาคผนวก ฉ ผลการวัดอุณหภูมิภายในระบบระหว่างการกรอง.....	142
ภาคผนวก ช การคำนวณจุกุ่มทุน.....	144
ภาคผนวก ซ ข้อมูลการทดลอง.....	146
ประวัติผู้เขียน	216

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
5.1	สภาวะที่ใช้ในการทดลอง..... 35
5.2	สภาวะที่ใช้ในการทดสอบการเกิดควาวิเทชั่นบนอนุภาคนิเยมพอยล์..... 36
5.3	สภาวะที่ใช้ในการทดสอบการเกิดควาวิเทชั่นโดยการเรืองแสงด้วยสารเคมี..... 36
5.4	สภาวะที่ใช้ในการทดสอบการกำจัดอนุภาคดินเหนียว..... 36
5.5	สภาวะในการกรองสำหรับศึกษาผลของคลื่นเหนือเสียงต่อเยื่อแผ่น โดยการวิเคราะห์ขนาดรูพรุนด้วยปรอท..... 37
5.6	สภาวะในการกรองสำหรับการศึกษาผลของคลื่นเหนือเสียงต่อเยื่อแผ่น โดยการถ่าย SEM..... 38
6.1	แสดงค่าความต้านทานการกรองกรณีที่มีและไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง ที่ความเร็วรอบต่างกัน..... 45
6.2	แสดงเวลาของเยื่อแผ่นในสัมผัสคลื่นเหนือเสียงที่ความเร็วรอบต่างๆ..... 53
6.3	แสดงค่าความต้านทานการกรองที่ความเข้มของคลื่นเหนือเสียงและความเร็วรอบ ในการหมุนต่างกัน..... 55
6.4	แสดงค่าความต้านทานการกรองกรณีที่มีและไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียงที่ความ เข้มข้นของสายป้อนมีค่าต่างกัน..... 71
6.5	แสดงค่าความต้านทานการกรองกรณีที่มีและไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง ที่ความดันคร่อมเยื่อแผ่นต่างกัน..... 83
6.6	แสดงค่าเปอร์เซ็นต์รีเจคชั่นที่เวลาต่างๆ เมื่อมีการใช้และไม่ใช้คลื่นเหนือเสียง ร่วมกับการกรอง ที่ความเข้มของคลื่นเหนือเสียงต่างกัน..... 85
6.7	แสดงค่าขนาดรูพรุนเฉลี่ยและความพรุนของเยื่อแผ่นเมื่อทำการกรองที่สภาวะต่างๆ 86
6.8	แสดงค่าใช้จ่ายทั้งหมดของการกรองในกรณีที่ไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง และมีการ ใช้คลื่นเหนือเสียงทั้งแบบไม่หมุนและหมุนเยื่อแผ่น..... 97
6.9	เปรียบเทียบจุดคุ้มทุนของการใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมกับการกรองแบบไม่หมุนและ หมุนเยื่อแผ่น..... 98
6.10	แสดงค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมในการเปลี่ยนเยื่อแผ่น..... 99

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
3.1	เปรียบเทียบระหว่างการกรองแบบไหลผ่านและการกรองแบบไหลขนาน.....	8
3.2	แสดงความเข้มข้นที่ผิวเยื่อแผ่น.....	9
3.3	ไดอะแกรมแสดงลักษณะเครื่องกรองชนิดหมุนได้.....	12
3.4	กราฟแสดงขอบเขตของการเกิดการหมุนวนของเทย์เลอร์.....	15
4.1	แสดงตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงความเข้มสูง.....	23
4.2	การสะท้อนของคลื่นเหนือเสียง.....	25
5.1	ภาพถ่ายระบบที่ใช้ในการทดลอง.....	29
5.2	แผนผังการทดลอง.....	29
5.3	เครื่องกรองแบบหมุนพร้อมติดตั้งตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง.....	31
5.4	เยื่อแผ่นเซรามิค.....	31
5.5	อุปกรณ์ทางไฟฟ้า.....	32
5.6	แผนผังแสดงการจ่ายไฟฟ้าให้กับตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง.....	33
6.1	แสดงการหลุดออกของอนุภาคที่สะสมบนผิวของเยื่อแผ่นเนื่องจากการยุบตัวของควิวเทชัน.....	42
6.2	แสดงลักษณะการลดการสะสมของอนุภาคบนผิวของเยื่อแผ่นโดยคลื่นเหนือเสียงเมื่อมีการหมุนเยื่อแผ่น.....	43
6.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอมีเอทพลັกซ์และเวลา ในกรณีที่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 0, 10, 20, 50 และ 100 รอบต่อนาที ตามลำดับ	45
6.4	แสดงการหลุดออกของชั้นเค้กที่มีความหนาไม่เท่ากันเมื่อคลื่นเหนือเสียงตกกระทบ.....	47
6.5	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเพอมีเอทพลັกซ์ของน้ำเปล่าและเวลา ที่ความเร็วรอบในการหมุน 0, 5, 20, 100 รอบต่อนาที	48
6.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอมีเอทพลັกซ์และเวลา ในกรณีที่ไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 0, 10, 20, 50 และ 100 รอบต่อนาที	49
6.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและค่าพลັกซ์ที่สภาวะคงที่ เมื่อมีการใช้คลื่นเหนือเสียงที่ความเข้มเท่ากับ 0, 0.44, 1.76 และ 3.09 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร.....	51
6.8	ภาพถ่ายขวางแสดงการหมุนของเยื่อแผ่นขณะมีการใช้คลื่นเหนือเสียง.....	52

สารบัญรูป (ต่อ)

ฎ

รูปที่		หน้า
6.9	แสดงคาบของจุดไศวนบนเยื่อแผ่นเมื่อสัมผัสคลื่นเหนือเสียง.....	52
6.10	การใช้ลูมิเนียมฟอสฟอไรต์ทดสอบความเข้มและบริเวณที่คลื่นเหนือเสียงผ่าน ที่ความเข้ม 3.09 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 10 นาที กรณีหมุนเยื่อแผ่น ที่ความเร็วรอบต่างกัน (ไม่มีการไหลของน้ำ)	57
6.11	การใช้ลูมิเนียมฟอสฟอไรต์ทดสอบความเข้มและบริเวณที่คลื่นเหนือเสียงผ่าน ที่ความเข้ม 3.09 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 10 นาที กรณีหมุนเยื่อแผ่น ที่ความเร็วรอบต่างกัน (มีการไหลของน้ำ).....	58
6.12	ภาพถ่ายแสดงการเรืองแสงของสารเคมี (Chemiluminescence) เนื่องจากคลื่น- เหนือเสียงที่ความเข้มของคลื่นเหนือเสียง 3.09 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร กรณีหมุนเยื่อแผ่นที่ความเร็วรอบต่างกัน.....	59
6.13	ภาพแสดงการกำจัดอนุภาคดินเหนียวบนเยื่อแผ่นโดยคลื่นเหนือเสียงเป็นเวลา 30 วินาที ที่ความเร็วรอบในการหมุน 0 รอบต่อนาที.....	62
6.14	ภาพแสดงการกำจัดอนุภาคดินเหนียวบนเยื่อแผ่นโดยคลื่นเหนือเสียงเป็นเวลา 30 วินาที ที่ความเร็วรอบในการหมุน 5 รอบต่อนาที.....	64
6.15	ภาพแสดงการกำจัดอนุภาคดินเหนียวบนเยื่อแผ่นโดยคลื่นเหนือเสียงเป็นเวลา 30 วินาที ที่ความเร็วรอบในการหมุน 20 รอบต่อนาที.....	66
6.16	ภาพแสดงการกำจัดอนุภาคดินเหนียวบนเยื่อแผ่นโดยคลื่นเหนือเสียงเป็นเวลา 30 วินาที ที่ความเร็วรอบในการหมุน 100 รอบต่อนาที.....	68
6.17	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอมีเอทฟลักซ์และเวลา กรณีไม่มีการใช้คลื่น- เหนือเสียง เมื่อไม่หมุนเยื่อแผ่นและหมุนเยื่อแผ่นที่ความเร็วรอบ 20 รอบต่อนาที ที่ความเข้มข้นสารละลายยีสต์ 5, 10 และ 20 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ.....	70
6.18	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสายป้อนและค่าฟลักซ์ที่สภาวะ คงที่ เมื่อไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียงและใช้คลื่นเหนือเสียงที่ 1.76 วัตต์ต่อตาราง- เซนติเมตร.....	72
6.19	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอมีเอทฟลักซ์และเวลา กรณีไม่มีการหมุน เยื่อแผ่น เมื่อไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียงและมีการใช้คลื่นเหนือเสียงที่ 1.76 วัตต์ต่อ ตารางเซนติเมตร ที่ความเข้มข้นสารละลายยีสต์ 5, 10 และ 20 กรัมต่อลิตร.....	73

สารบัญรูป (ต่อ)

ฎ

รูปที่		หน้า
6.20	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอมีเอทฟลักซ์และเวลา กรณีมีการหมุนเยื่อแผ่น เมื่อไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียงและมีการใช้คลื่นเหนือเสียง ที่ความเข้มของคลื่นเหนือเสียง 1.76 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ความเข้มข้นสารละลายยีสต์ 5, 10 และ 20 กรัมต่อลิตร.....	74
6.21	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของคลื่นเหนือเสียงและค่าฟลักซ์ที่สภาวะคงที่ เมื่อความเร็วรอบในการหมุนต่างกัน คือ 0, 5, 10, 20, 50 และ 100 รอบต่อนาที.....	75
6.22	การใช้อลูมิเนียมฟอยล์ทดสอบความเข้มและบริเวณที่คลื่นเหนือเสียงผ่านเมื่อไม่มีการหมุนของเยื่อแผ่น เป็นเวลา 10 นาที ที่ความเข้มของคลื่นเหนือเสียงต่างกัน.....	77
6.23	ภาพถ่ายแสดงการเรืองแสงของสารเคมี (Chemiluminescence) เนื่องจากคลื่นเหนือเสียง กรณีที่ไม่มีการหมุนของเยื่อแผ่น ที่ความเข้มของคลื่นเหนือเสียงต่างกัน	79
6.24	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอมีเอทฟลักซ์และเวลา ในกรณีไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง ที่ความดันคร่อมเยื่อแผ่น 0.22, 0.35 และ 0.46 บาร์ ตามลำดับ.....	82
6.25	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันคร่อมเยื่อแผ่นและค่าฟลักซ์ที่สภาวะคงที่ เมื่อไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียงและมีการใช้คลื่นเหนือเสียงที่ 1.76 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ในกรณีที่ไม่มีการหมุนและและมีการหมุนที่ 5 รอบต่อนาที	84
6.26	ภาพถ่ายจาก SEM แสดงผิวหน้าของเยื่อแผ่นที่ผ่านการกรองกรณีที่ไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง	87
6.27	ภาพถ่ายจาก SEM แสดงผิวหน้าของเยื่อแผ่นที่ผ่านการกรองร่วมกับการใช้คลื่นเหนือเสียงที่ 0.44 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตรและไม่หมุนเยื่อแผ่น.....	88
6.28	ภาพถ่ายจาก SEM แสดงผิวหน้าของเยื่อแผ่นที่ผ่านการกรองร่วมกับการใช้คลื่นเหนือเสียงที่ 0.44 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตรและหมุนเยื่อแผ่นที่ 5 รอบต่อนาที.	88
6.29	ภาพถ่ายจาก SEM แสดงผิวหน้าของเยื่อแผ่นที่ผ่านการกรองร่วมกับการใช้คลื่นเหนือเสียงที่ 1.76 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตรและไม่หมุนเยื่อแผ่น.....	89
6.30	ภาพถ่ายจาก SEM แสดงผิวหน้าของเยื่อแผ่นที่ผ่านการกรองร่วมกับการใช้คลื่นเหนือเสียงที่ 1.76 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตรและหมุนเยื่อแผ่นที่ 20 รอบต่อนาที	89
6.31	ภาพถ่ายจาก SEM แสดงผิวหน้าของเยื่อแผ่นที่ผ่านการกรองร่วมกับการใช้คลื่นเหนือเสียงที่ 3.09 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตรและไม่หมุนเยื่อแผ่น.....	90

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
6.32	ภาพถ่ายจาก SEM แสดงผิวหน้าของเยื่อแผ่นที่ผ่านการกรองร่วมกับการใช้คลื่น เหนือเสียงที่ 3.09 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตรและหมุนเยื่อแผ่นที่ 20 รอบต่อนาที.....	90
6.33	กราฟการกระจายขนาดของอนุภาคยีสต์ที่เก็บตัวอย่างจากถังป้อน ณ เวลา 0, 30 และ 60 นาที กรณีที่มีการกรองร่วมกับการใช้คลื่นเหนือเสียง.....	92
6.34	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 400 เท่า ของยีสต์ที่เก็บตัวอย่างจาก ถังป้อน ณ เวลาต่างๆ เมื่อทำการกรองและใช้คลื่นเหนือเสียงที่ความเข้ม 3.09 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร.....	94
6.35	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า ของยีสต์เมื่อทำการผ่าน คลื่นเหนือเสียงจากอัลตราโซนิคโพรบ ที่ความเข้มของคลื่นเหนือเสียง 30 วัตต์ต่อ ตารางเซนติเมตร ที่เวลาต่างๆ.....	95

สัญลักษณ์

A	พื้นที่หน้าตัดตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง (ตารางเซนติเมตร)
c	ความเร็วของคลื่นเสียงในตัวกลาง (เมตรต่อวินาที)
C	ตัวเก็บประจุ (ฟารัด)
C_b	ความเข้มข้นของอนุภาคแขวนลอยด้านสายป้อน (กรัมต่อลิตร)
C_g	ความเข้มข้นของอนุภาคแขวนลอยที่ทำให้เกิดชั้นเจล (กรัมต่อลิตร)
C_p	ความเข้มข้นของอนุภาคแขวนลอยด้านเพอมีเอท (กรัมต่อลิตร)
C_s	ความเข้มข้นของอนุภาคแขวนลอยที่ผิวของเยื่อแผ่น (กรัมต่อลิตร)
d_h	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (เซนติเมตร)
D	สัมประสิทธิ์การแพร่ของอนุภาคแขวนลอย (ตารางเซนติเมตรต่อวินาที)
f	ความถี่คลื่นเสียง (เฮิทซ์)
I	กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจร (แอมแปร์)
l	ความเข้มของคลื่นเหนือเสียง (วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร)
J	ฟลักซ์การกรองของเยื่อแผ่น (มิลลิเมตรต่อตารางเซนติเมตร-วินาที)
K	ค่าโพลีโทรปิกอินเด็ก (polytropic index) ของก๊าซ (-)
L	ตัวเหนี่ยวนำ (ซีเมนซ์)
n	ความเร็วรอบการหมุนของเยื่อแผ่น (รอบต่อวินาที)
P	กำลังไฟฟ้าที่ป้อน (วัตต์)
P	ความดันภายในคาวีเทชัน ขณะที่คาวีเทชันมีขนาดใหญ่ที่สุด (กิโลปาสคาล)
P_a	ความดันของคลื่นเหนือเสียง (กิโลปาสคาล)
P_A	แอมพลิจูดของคลื่น (กิโลปาสคาล)
P_i	ความดันขาเข้า (กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร)
P_f	ความดันด้านเพอมีเอท (กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร)
P_g	ความดันของก๊าซภายในคาวีเทชัน (กิโลปาสคาล)
P_h	ความดันภายในของเหลว เนื่องจากแรงกดของน้ำ (กิโลปาสคาล)
P_m	ความดันภายในฟองของเหลว ณ เวลาที่เกิดการยุบตัวของคาวีเทชัน (กิโลปาสคาล)
P_{max}	ความดันสูงสุดที่เกิดจากการยุบตัวของคาวีเทชันอย่างสมบูรณ์ (กิโลปาสคาล)

สัญลักษณ์ (ต่อ)

P_o	ความดันขาออก (กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร)
P_v	ความดันไอภายในควาวิเทชั่น (กิโลปาสคาล)
P_{vg}	ผลรวมของความดันและความดันของก๊าซภายในควาวิเทชั่น (กิโลปาสคาล)
R	สัมประสิทธิ์การสะท้อน (-)
R	เปอร์เซ็นต์การเก็บกักของเยื่อแผ่น
R_1	รัศมีภายนอกของเยื่อแผ่น (เซนติเมตร)
R_2	รัศมีภายในของท่อทรงกระบอกที่อยู่กับที่ (เซนติเมตร)
R_C	ความต้านทานการกรองของอนุภาคที่สะสมอยู่บนผิวเยื่อแผ่น (ต่อเซนติเมตร)
Re_a	ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ตามแนวแกน (-)
Re_t	ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เนื่องจากการหมุนของเยื่อแผ่น (-)
R_M	ความต้านทานการกรองของเยื่อแผ่น (เซนติเมตร ⁻¹)
R_m	รัศมีของควาวิเทชั่นก่อนยุบตัว (ไมโครเมตร)
R_{max}	รัศมีของควาวิเทชั่นที่ใหญ่ที่สุด (เซนติเมตร)
R_p	ความต้านทานเนื่องจากการอุดตันภายในรูพรุนของเยื่อแผ่น (เซนติเมตร ⁻¹)
T_a	ค่าเทเลอร์นัมเบอร์ (Taylor Number) (-)
T_o	อุณหภูมิของของเหลว (เคลวิน)
T_{max}	อุณหภูมิสูงสุดที่ได้จากการยุบตัวของควาวิเทชั่นอย่างสมบูรณ์ (เคลวิน)
v	ความหนืดคินมาติก (ตารางเซนติเมตรต่อวินาที)
v	คือ ความเร็วของสารละลายตามแนวแกน (เซนติเมตรต่อวินาที)
V	ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวกำเนิดคลื่นเสียง (โวลต์)
Z_{metal}	ค่าอะคูสติคิมพีแดนซ์ของโลหะ (กรัมต่อตารางเซนติเมตร-วินาที)
$Z_{ceramic}$	ค่าอะคูสติคิมพีแดนซ์ของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิค (กรัมต่อตารางเซนติเมตร-วินาที)
Z_{liquid}	ค่าอะคูสติคิมพีแดนซ์ของตัวกลางที่เสียงเคลื่อนที่ผ่าน (กรัมต่อตารางเซนติเมตร-วินาที)
Z	ค่าอะคูสติคิมพีแดนซ์ (กรัมต่อตารางเซนติเมตร-วินาที)

สัญลักษณ์ (ต่อ)

อักษรกรีก

ΔP_{TM}	ความดันคร่อมเยื่อแผ่น (กิโลกรัมต่อเซนติเมตร-นาที่)
Δ	ความกว้างของช่องว่างระหว่างผนังทรงกระบอกกับผนังเยื่อแผ่นด้านนอก (เซนติเมตร)
δ	ความหนาของชั้นขอบเขต (เซนติเมตร)
μ	ความหนืดของของเหลว (กรัมต่อเซนติเมตร-นาที่)
ν	ความหนืดคิเนมาติก (ตารางเซนติเมตรต่อนาที่)
π	ค่าคงที่ (-)
θ	เฟสที่แตกต่างระหว่างความต่างศักย์กับกระแสที่ไหลในวงจร (องศา)
ρ	ความหนาแน่นของของเหลว (กรัมต่อลิตร)
σ	แรงตึงผิวของของเหลว (นิวตันต่อเมตร)
σ	สัมประสิทธิ์ในการเก็บกักของเยื่อแผ่น (-)
τ	อัตราเฉือน (Effective Shear Rate) (ต่อวินาที)
τ	เวลาที่ใช้ในการยุบตัวของฟอง (วินาที)
ω	ความถี่เชิงมุม (เฮิทซ์)
ω	ค่าความเร็วเชิงมุมมีค่าเท่ากับ $2\pi n$ (เรเดียนต่อวินาที)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในอุตสาหกรรมทางการเกษตร จำเป็นต้องมีกรรมวิธีในการแยกอนุภาคของแข็งออกจากของเหลว เพื่อให้บริสุทธิ์หรือเพิ่มความเข้มข้น เช่น การตกตะกอน การปั่นเหวี่ยง การกลั่น เป็นต้น และในปัจจุบันการกรองเป็นกระบวนการหนึ่งที่ถูกใช้บ่อยและนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากใช้พลังงานในการแยกต่ำ และได้มีการพัฒนาเยื่อแผ่นที่ใช้ในกระบวนการกรองให้มีประสิทธิภาพสูง และสามารถแยกสารที่ต้องการได้ที่อุณหภูมิปกติของสารนั้น เหมาะกับผลิตภัณฑ์ที่ไวต่อความร้อน เช่น ผลิตภัณฑ์อาหาร เครื่องดื่ม ผลิตภัณฑ์ยา เป็นต้น

การกรองระดับอนุภาค (Microfiltration) เป็นกระบวนการแยกโดยการซึมผ่านเยื่อแผ่นวิธีหนึ่งโดยให้สารละลายไหลผ่านเยื่อแผ่น โดยมีแรงดันเป็นแรงขับ ตัวทำละลายและอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของเยื่อแผ่นจะผ่านเยื่อแผ่นออกไปได้ ส่วนอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเยื่อแผ่นจะถูกเก็บกักไว้ในระบบ วิธีการกรองที่ให้อัตราการกรองสูงสุด คือ การกรองแบบไหลขนานกับเยื่อแผ่น (Cross-flow Microfiltration) เนื่องจากการกรองโดยวิธีนี้ จะมีการป้อนสารให้ไหลขนานไปกับเยื่อแผ่น ทำให้เกิดแรงเฉือนขึ้นกับอนุภาคที่เก็บกักไว้บนผิวเยื่อแผ่น เป็นผลให้อนุภาคเหล่านั้นหลุดไปกับสายป้อน ความหนาของชั้นอนุภาคที่สะสมบนเยื่อแผ่นจึงลดลง อัตราการกรองจึงเพิ่มขึ้น แต่วิธีนี้มีข้อเสียคือเมื่อใช้เป็นระยะเวลาจะเกิดปัญหาการอุดตันของเยื่อแผ่นทำให้อัตราการกรองที่ได้ลดลง แต่การเพิ่มความเร็วยของสายป้อนมากเกินไป จะทำให้อนุภาคซึ่งเป็นจุดอันตรายสูญเสียคุณสมบัติเนื่องจากแรงเฉือนที่เกิดขึ้น

จากสาเหตุที่กล่าวมาแล้ว จึงมีความพยายามที่จะคิดค้นเทคนิคใหม่ๆ เพื่อลดปัญหาที่กล่าวมา ปัจจุบันจึงมีงานวิจัยมากมายซึ่งพัฒนาการกรองแบบไหลขนานเพื่อให้มีประสิทธิภาพมากที่สุดคือให้มีอัตราการกรองที่สูงแต่ใช้พลังงานต่ำ เช่น การป้อนสารเข้าสู่ระบบเป็นจังหวะ โดยใช้ปั๊มเป็นตัวควบคุม, การทำให้เกิดการหมุนวนในสายป้อน โดยมีอุปกรณ์ควบคุมทิศทางไหล, การทำให้เยื่อแผ่นหมุน, การเติมประจุให้กับอนุภาค ซึ่งต้องเลือกเยื่อแผ่นที่มีประจุเหมือนกับอนุภาคมาทำการกรอง เป็นต้น วิธีการเหล่านี้สามารถลดความหนาของชั้นอนุภาคลงได้ แต่อาจมีข้อจำกัดที่ยุ่งยากและไม่สามารถกระทำอย่างต่อเนื่องได้ จึงได้มีการคิดค้นเทคนิคใหม่ขึ้น คือ การใช้คลื่นเหนือเสียงในการกำจัดอนุภาคที่เกาะติดอยู่บนเยื่อแผ่นและภายในรูพรุนของเยื่อแผ่นให้

หลุดออกไป โดยไม่จำเป็นต้องใช้ความเร็วในสายป้อนสูงหรือการทำให้เกิดแรงเฉือนบนผิวเยื่อแผ่น และสามารถกระทำได้อย่างต่อเนื่องไม่ต้องหยุดการกรองเพื่อกำจัดอนุภาค ในงานวิจัยที่ผ่านมาของบงกช งามสม [1] เรื่องผลของคลื่นเหนือเสียงต่อการกรองระดับอนุภาคในโมดูลแบบท่อ พบว่าคลื่นเหนือเสียงสามารถเพิ่มอัตราการกรองได้ถึง 50-150% เมื่อเปรียบเทียบกับเมื่อไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง ในการทดลองมีการใช้ตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงจำนวน 2-4 ตัว ติดตั้งรอบท่อเพื่อครอบคลุมพื้นที่ของการกำจัดอนุภาคตลอดพื้นที่การกรองของเยื่อแผ่น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาผลของการใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมกับการกรองระดับอนุภาคในเครื่องกรองแบบท่อหมุน โดยมีจุดประสงค์เพื่อลดจำนวนตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงโดยมีการใช้ท่อหมุนแทน เพื่อให้พื้นที่การกรองตลอดเยื่อแผ่นสามารถได้รับผลของการกำจัดอนุภาคที่สะสมบนเยื่อแผ่นจากตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงที่อยู่หนึ่ง

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมกับการกรองระดับอนุภาคในเครื่องกรองแบบหมุน
2. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการกรองของเครื่องกรองแบบหมุนร่วมกับการใช้คลื่นเหนือเสียง

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. สร้างและติดตั้งตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงบนเครื่องกรองแบบหมุน
2. ศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการกรองยีสต์ ดังนี้
 - ความเร็วรอบในการหมุน
 - ความเข้มข้นของสายป้อน
 - ความเข้มของของคลื่นเหนือเสียง
 - ความดันคร่อมเยื่อแผ่น
3. หากภาวะที่เหมาะสมในการกรองโดยเครื่องกรองแบบหมุนร่วมกับการใช้คลื่นเหนือเสียง

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการกรองระดับอนุภาคแบบไหลขนาน (Cross-flow Microfiltration) เป็นกระบวนการที่เหมาะสมสำหรับขั้นตอนการเก็บเกี่ยวผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเซลล์ (Cell Harvesting) หรือขั้นตอนการกำจัดเซลล์ออกจากระบบ จึงมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในเทคโนโลยีชีวภาพ แต่มีข้อจำกัดบางอย่างคือเมื่อกรองต่อเนื่องเป็นระยะเวลาสั้น จะเกิดการสะสมของอนุภาคบนเยื่อแผ่น ทำให้อัตราการกรอง (Permeation Rate) ลดลง ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนากระบวนการกรองระดับอนุภาคแบบไหลขนานต่าง ๆ ขึ้นเพื่อให้ได้อัตราการกรองที่สูงสุดโดยลดการสะสมของอนุภาคบนผิวเยื่อแผ่น ทำให้การกรองเป็นไปอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน การปรับเปลี่ยนเงื่อนไขในกระบวนการกรองทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงค่าความดันระหว่างเยื่อแผ่น การเลือกเยื่อแผ่น และความเร็วของสายป้อน [2]

สาเหตุที่ทำให้อัตราการกรองลดลงคือ อนุภาคบางส่วนที่ไม่ได้ไหลไปกับสายป้อนจะเกิดการสะสมบนเยื่อแผ่น เนื่องจากเซลล์หรืออนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเยื่อแผ่นไม่สามารถไหลผ่านรูพรุนของเยื่อแผ่น ส่วนอนุภาคขนาดเล็กบางส่วนเกิดการดูดซับ (Adsorption) ในรูพรุนของเยื่อแผ่น [3] เมื่อการกรองดำเนินไป การอุดตันของอนุภาคทั้ง 2 วิธีจะเพิ่มขึ้น ทำให้ความต้านทานการกรองของเยื่อแผ่นมีค่าสูงขึ้น [4,5,6] อัตราการกรองจึงลดลง ในขณะที่การเก็บกักของเยื่อแผ่นมีค่าสูงขึ้น

การเพิ่มความเร็วของสายป้อนจะเป็นการเพิ่มแรงเฉือนที่ผิวหน้าของเยื่อแผ่นให้สูงขึ้น [2,6,7] ทำให้อนุภาคบางส่วนหลุดออกและรวมกับสายป้อน อัตราการกรองของระบบจะแปรผันตามความเร็วของสายป้อนและแปรผกผันกับความหนาของชั้นอนุภาคที่สะสม ดังนั้นถ้าความเร็วสายป้อนมีค่ามากจะทำให้ได้อัตราการกรองสูงและความสามารถในการเก็บกักน้อยลงแต่ไม่นิยมใช้กับกระบวนการทางชีวภาพ เนื่องจากคุณสมบัติของจุลินทรีย์จะเปลี่ยนแปลงไป

อิทธิพลของความดันคร่อมเยื่อแผ่น (Transmembrane Pressure) เป็นตัวแปรสำคัญต่ออัตราการกรองของระบบ การเพิ่มความดันจะส่งผลให้ระบบมีแรงขับเคลื่อนสารละลายผ่านเยื่อแผ่นมากขึ้น แต่ถ้าเพิ่มแรงดันมากเกินไป จะทำให้อนุภาคที่สะสมเกิดการอัดตัวกันแน่น ความต้านทานการกรองจึงมีค่าสูง ส่งผลให้อัตราการกรองเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจนเกือบคงที่ [2] โดยที่การเพิ่มความดันจะส่งผลต่อค่าความต้านทานการกรองเนื่องจากการสะสมของอนุภาคบนเยื่อแผ่นมากกว่าความต้านทานเนื่องจากอนุภาคที่อุดตันในรูพรุนของเยื่อแผ่น [6]

การเพิ่มอุณหภูมิของระบบจะทำให้อัตราการกรองเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากความหนืดของสารละลายมีค่าลดลง ในขณะที่ความสามารถในการเก็บกักมีค่าคงเดิม [8] สำหรับขนาดรูพรุนของเยื่อแผ่นไม่มีความสัมพันธ์กับค่าอัตราการกรองโดยตรง แต่สามารถทำการทดลองหาค่าขนาดรูพรุนของเยื่อแผ่นที่เหมาะสมกับสารละลายแต่ละชนิดได้ ขึ้นกับแรงกระทำ (Interaction Force) ระหว่างเยื่อแผ่นกับอนุภาคที่ทำการกรอง [2,3]

สำหรับงานวิจัยที่มีการนำคลื่นเหนือเสียงมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการกรองพบว่าสามารถเพิ่มอัตราการกรองและกำจัดอนุภาคที่สะสมอยู่บนเยื่อแผ่นให้หลุดออกไปได้

Kokugan และ คณะ [9] ได้ทำการศึกษาผลของคลื่นเหนือเสียงต่อการกรองระดับโมเลกุล โดยใช้สารละลาย 3 ชนิดมาทำการทดลอง คือ โอวาอัลบูมิน (Ovalbumin) เป็นสารที่เกิดชั้นเจลง่าย, Dextran 100-200 เกิดชั้นเจลยาก และ PVA-500 ซึ่งเป็นสารที่เกิดชั้นเจลอยู่ระหว่างการเกิดเจลยากและง่าย โดยพื้นที่สัมผัสกับคลื่นเหนือเสียงประมาณ 1/8 ของพื้นที่ผิวเยื่อแผ่น ในกระบวนการกรองจะใช้พลังงานระหว่าง 70 -100 วัตต์ ความถี่ 200-400 กิโลเฮิรตซ์ เยื่อแผ่นที่ใช้เป็นแบบท่อผลิตจากเซรามิคชนิดไม่สมมาตร (Asymmetric Membrane) มีรูพรุนที่ใช้กรองขนาด 0.05 ไมโครเมตร และด้านรองรับมีขนาด 0.5 ไมโครเมตร ซึ่งพบว่าคลื่นเหนือเสียงจะช่วยลดการเกิดชั้นเจลและชั้นขอบเขตลงแต่ไม่สามารถทำให้การอุดตันในรูพรุนของเยื่อแผ่นลดลง และทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (Mass Transfer Coefficient) มีค่าสูงขึ้น 1.4 เท่าไม่ว่าสารที่กรองจะเกิดชั้นเจลยากหรือง่าย

คลื่นเหนือเสียงจะทำให้ความสามารถในการเก็บกัก (Observed Rejection) มีค่าลดลงเล็กน้อย เนื่องจากมีการเพิ่มฟลักซ์การกรองทั้งในส่วนของสารละลายที่เกิดชั้นเจลง่ายและยากได้

Mutsumoto และ คณะ [10] ได้ศึกษาวิธีการป้องกันการอุดตันของการกรองระดับอนุภาคแบบไหลขนานโดยการใช้คลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่ 28 กิโลเฮิรตซ์ สารละลายที่ใช้กรองคือ สารละลายยีสต์ (Baker's yeast) และธาตุโปรตีนที่ได้จากน้ำนมวัว (Bovine Serum Albumine, BSA) โดยแบ่งเป็น 2 การทดลอง การทดลองแรกจะใช้เยื่อแผ่นแบบท่อผลิตจากเซรามิค พบว่าคลื่นเหนือเสียงสามารถทำให้ค่าฟลักซ์การกรองเพิ่มได้ 4-6 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับตอนไม่เปิดเสียงแม้ความเร็วสายป้อนต่ำ ซึ่งเยื่อแผ่นต้องมีขนาดรูพรุนและทำที่ความดันเหมาะสม เนื่องจากคลื่นเหนือเสียงสามารถทำให้ชั้นเค้ก (Cake Layer) บนผิวเยื่อแผ่นหลุดและลดการอุดตันในรูพรุนของเยื่อแผ่น และค่าการเก็บกักที่ได้มีความแตกต่างกันน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่ใช้คลื่นเหนือเสียง

สำหรับการทดลองที่สองจะเป็นการกรองแบบสลับระหว่างการบีบและการใช้คลื่นเหนือเสียง เยื่อแผ่นที่ใช้เป็นโพลิเมอร์พบว่าสามารถให้ค่าฟลักซ์การกรองที่สูงตลอด

จิตติวุฒิ เพชรมณี [11] ได้ศึกษากระบวนการกรองระดับอนุภาคที่มีการใช้คลื่นเหนือเสียงเพื่อกำจัดอนุภาคที่สะสมอยู่บนเยื่อแผ่น โดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการกรองสารละลายยีสต์ในโมดูลแบบแผ่น เยื่อแผ่นที่ใช้ คือ ไนลอน 66 ขนาดรูพรุนเท่ากับ 0.2 ไมโครเมตร มีการติดตั้งตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง 2 ตัว ที่ผนังด้านนอกของเครื่องกรอง เพื่อส่งผ่านคลื่นเหนือเสียงไปในระบบทั้งในทิศทางเดียวกันและตรงข้ามกับการกรอง ตัวแปรที่ศึกษาคือ ความดันคร่อมเยื่อแผ่น ความเข้มข้นของคลื่นเหนือเสียง ความเข้มข้นของสายป้อน ความเร็วของสายป้อน ช่วงเวลาในการปล่อยคลื่นเหนือเสียง และระยะห่างระหว่างตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับเยื่อแผ่น

ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มความดันคร่อมเยื่อแผ่น จะทำให้อัตราการกรองเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความดันไปถึงค่าหนึ่งอัตราการกรองจะลดลง การเพิ่มความเข้มข้นของคลื่นเหนือเสียงพบว่า ถ้าความเข้มข้นของคลื่นเหนือเสียงมากเกินไป จะส่งผลให้ความรุนแรงของคาวิทേഷันมีค่าลดลง อัตราการกรองจึงมีค่าลดลงด้วย และการใช้คลื่นเหนือเสียงจะได้ผลดีที่ความเร็วของสายป้อนและความเข้มข้นของสารละลายยีสต์มีค่าต่ำ และเมื่อมีการใช้คลื่นเหนือเสียงในสภาวะการปฏิบัติการที่เหมาะสม อัตราการกรองสามารถเพิ่มได้ 3 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับเมื่อไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง

ความเข้มข้นของคลื่นเหนือเสียงและทิศทางในการปล่อยคลื่น จะมีผลต่อความสามารถในการเก็บกักของเยื่อแผ่น ที่สภาวะที่ใช้ในการทดลองพบว่าคลื่นเหนือเสียงจะไม่ส่งผลต่อขนาดและการเจริญเติบโตของยีสต์

บังกช งามสม [1] ได้ทำการศึกษาการใช้คลื่นเหนือเสียงในกระบวนการกรองระดับอนุภาคในโมดูลแบบท่อ เยื่อแผ่นที่ใช้คือท่อเซรามิคขนาดรูพรุนเท่ากับ 0.2 ไมโครเมตร และใช้สารละลายยีสต์ในการทดลอง โดยมีการติดตั้งตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง 2 ตัว บริเวณผนังด้านนอกของเครื่องกรอง โดยมีพื้นที่ของตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงคิดเป็น 1/10 เท่าของพื้นที่การกรองเพื่อส่งผ่านคลื่นเหนือเสียงในทิศทางตรงข้ามกับการกรอง ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาคือ ความดันคร่อมเยื่อแผ่น ความเร็วของสายป้อน ความเข้มข้นของสายป้อน ความเข้มข้นของคลื่นเหนือเสียง และความถี่ของคลื่นเหนือเสียง

เมื่อมีการใช้คลื่นเหนือเสียงในสภาวะการปฏิบัติการที่เหมาะสม อัตราการกรองสามารถเพิ่มได้ 3 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับเมื่อไม่ใช้คลื่นเหนือเสียง และที่สภาวะที่ใช้ในการทดลองพบว่าคลื่นเหนือเสียงจะไม่ส่งผลต่อขนาดและการเจริญเติบโตของยีสต์

Kobayashi และคณะ [12] ได้ทำการศึกษาผลของคลื่นเหนือเสียงต่ออัตราการกรองที่ได้จากการกรองระดับไมเลกุลของสารละลายเด็กแทนผ่านเยื่อแผ่นโพลีอะคริโลไนไตรล์ (Polyacrylonitrile) โดยนำเอาชุดตัวกรองจุ่มลงในอ่างทำความสะอาดด้วยคลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่ของคลื่นเหนือเสียง 28, 45 และ 100 กิโลเฮิรตซ์ ความเข้มของคลื่นเหนือเสียงที่ใช้อยู่ในช่วง 2.5-3.3 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร พบว่าคลื่นเหนือเสียงสามารถเพิ่มเพอมีเอทฟลักซ์ได้ดีที่ความถี่ 28 และ 45 กิโลเฮิรตซ์ เนื่องจากที่ความถี่ต่ำเกิดปรากฏการณ์ควิเทชันได้ดีกว่าที่ความถี่สูง และเพอมีเอทฟลักซ์เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มของคลื่นเหนือเสียง นอกจากนี้พบว่าเมื่อความดันคร่อมเยื่อแผ่นเพิ่มขึ้นเพอมีเอทฟลักซ์ก็เพิ่มขึ้นด้วยและจะคงที่เมื่อความดันสูง สำหรับทิศทางการกรองพบว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญเช่นเดียวกันคือการส่งผ่านคลื่นเหนือเสียงในทิศทางเดียวกับทิศทางการกรองจะให้ฟลักซ์การกรองเพิ่มขึ้นมากที่สุด จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้คลื่นเหนือเสียงจะเป็นการเพิ่มการถ่ายเทมวลผ่านชั้น เด็กแทนที่เกาะบนผิวเยื่อแผ่น และเป็นการลดความเข้มข้นของสารละลายบนผิวเยื่อแผ่นทำให้ความดันออกสโมติกลดลง จึงเป็นการเพิ่มการซึมผ่านของเพอมีเอทผ่านเยื่อแผ่น

นอกจากการใช้คลื่นเหนือเสียงเพื่อช่วยในการเพิ่มฟลักซ์การกรองแล้วก็มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มฟลักซ์การกรองโดยวิธีการหมุน คือ การแยกเซลล์ *Alcaligenes eutrophus* ATCC17697 ที่มีพอลิ-เบตา-ไฮดรอกซีบิวทิเรตจากน้ำหมักโดยเครื่องกรองระดับอนุภาครูปทรงกระบอกชนิดหมุนได้ [13] ได้มีการศึกษาผลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการแยกเซลล์ด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้ ตัวแปรที่ทำการทดลองคือ ความเข้มข้นของสารป้อน ความดัน จำนวนรอบการหมุนของเยื่อแผ่น จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มเพอมีเอชันฟลักซ์สามารถกระทำได้โดยการเพิ่มจำนวนรอบการหมุน ซึ่งเป็นการเพิ่มแรงเฉือนให้กับผิวเยื่อแผ่นโดยกวาดอนุภาคที่เกาะบริเวณผิวเยื่อแผ่นให้หลุดออก ทำให้ความต้านทานการกรองเนื่องจากการอุดตันมีค่าน้อยลง การเพิ่มความดันในระบบการกรองที่เยื่อแผ่นอยู่กับที่ มีผลให้เพอมีเอชันฟลักซ์เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากการเกิดโพลาไรเซชันอย่างรวดเร็ว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

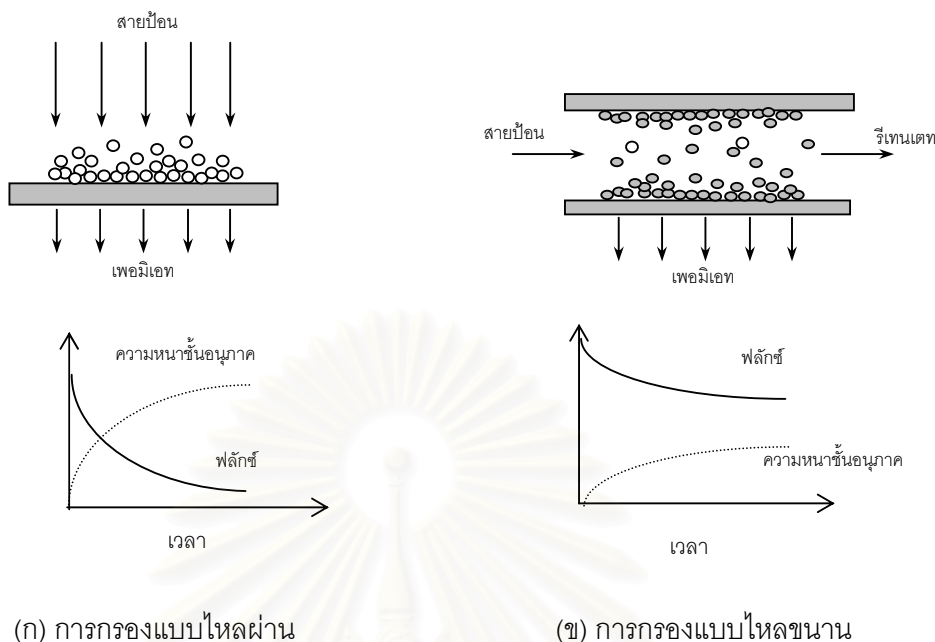
บทที่ 3

ทฤษฎีเกี่ยวกับการกรอง

กระบวนการกรองผ่านเยื่อแผ่น คือ กระบวนการกรองที่อาศัยเยื่อแผ่นในการเลือกผ่านอนุภาค โดยใช้ความแตกต่างของขนาดหรือน้ำหนักโมเลกุลของตัวถูกละลาย (Solute) หรือสารแขวนลอย (Suspension) เยื่อแผ่นจะยอมให้โมเลกุลขนาดเล็กผ่านไปได้ ส่วนโมเลกุลขนาดใหญ่จะถูกเก็บกักเอาไว้บนผิวเยื่อแผ่น กระบวนการกรองจะไม่มี การเปลี่ยนวัฏภาคภายในระบบ ไม่มีปฏิกิริยาเกิดขึ้น จะอาศัยความดันที่แตกต่างกันทำให้เกิดแรงขับ (Driving Force) โดยปกติความดันที่ใช้จะน้อยกว่า 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (7 บาร์) เมื่อทำการป้อนสารละลายเข้าสู่ระบบ สารที่มีขนาดโมเลกุลเล็กกว่าขนาดรูพรุนและสามารถผ่านเยื่อแผ่นไปได้เรียกว่าเพอเมอเทต (Permeate) ส่วนสารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าขนาดรูพรุนไม่สามารถผ่านเยื่อแผ่นไปได้จะถูกเก็บกักไว้บนเยื่อแผ่น เรียกว่ารีเทนเตต (Retentate) การนำไปใช้ประโยชน์อาจเป็นเพอเมอเทต หรือ รีเทนเตตก็ได้ กระบวนการกรองสามารถแบ่งได้ 3 ประเภทตามขนาดรูพรุนของเยื่อแผ่น ได้แก่ การกรองระดับอนุภาค (Microfiltration) การกรองระดับโมเลกุล (Ultrafiltration) และกระบวนการออสโมซิสผันกลับ (Reverse Osmosis)

รูปแบบการกรองแบ่งได้เป็น 2 แบบตามลักษณะการไหลของสายป้อน คือ

1. การกรองแบบไหลผ่าน (Dead-end Filtration) เป็นการกรองแบบเก่าที่มีประสิทธิภาพต่ำ เพราะเมื่อกรองไปเรื่อยๆ จะเกิดการอุดตันเนื่องจากความหนาของอนุภาคบนผิวเยื่อแผ่นเพิ่มขึ้น อัตราการกรองต่อหน่วยพื้นที่ของเยื่อแผ่น (Flux) จะมีค่าลดต่ำลงจนกระทั่งเป็นศูนย์เนื่องจากการอุดตันของสิ่งกรองหรือเค้ก (Cake) หนาขึ้นจนสารละลายไม่สามารถไหลผ่านไปได้ (รูปที่ 3.1 ก)
2. การกรองแบบไหลขนาน (Cross-flow Filtration) เป็นการกรองที่พัฒนามาจากแบบแรกให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยสายป้อนจะไหลขนานไปกับเยื่อแผ่นเพื่อเพิ่มแรงเฉือนให้กับอนุภาคที่ติดอยู่บนเยื่อแผ่นทำให้อนุภาคเหล่านี้หลุดไปกับสายป้อน อัตราการกรองจึงมากขึ้น และสามารถปฏิบัติการได้อย่างต่อเนื่องได้เป็นระยะเวลานาน (รูปที่ 3.1 ข)



(ก) การกรองแบบไหลผ่าน

(ข) การกรองแบบไหลขนาน

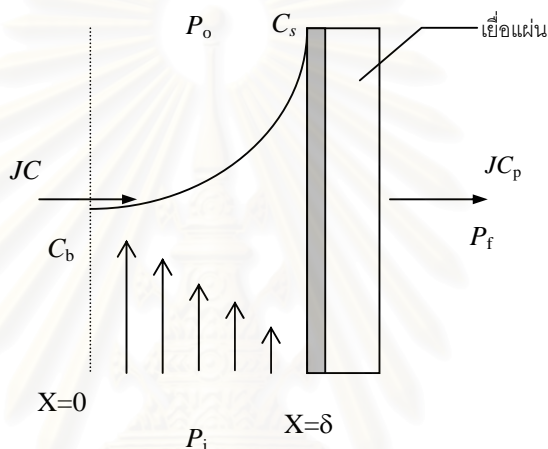
รูปที่ 3.1 เปรียบเทียบระหว่างการกรองแบบไหลผ่านและการกรองแบบไหลขนาน

3.1 การกรองระดับอนุภาคแบบไหลขนาน (Cross-flow Microfiltration)

การกรองระดับอนุภาค คือ กระบวนการกรองที่สามารถเก็บกักสารที่มีขนาดอนุภาคระหว่าง 0.1 – 10 ไมโครเมตร ได้ ขึ้นกับขนาดรูพรุนของเยื่อแผ่น วิธีการบอกคุณสมบัติของเยื่อแผ่นนิยมบอกค่าเป็นค่าอัตราการกรองต่อหน่วยพื้นที่ของเยื่อแผ่น และ โมเลกุลาร์เวทคัทออฟ [Molecular Weight Cut Off (MWCO)] ซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงความสามารถในการเก็บกักอนุภาคที่มีน้ำหนักโมเลกุลตามที่กำหนดหรือใหญ่กว่าได้มากกว่า 90% ขึ้นไป แต่ความสามารถในการเก็บกักสารยังขึ้นกับปัจจัยอื่นๆ อีก เช่น ชนิดและรูปร่างของอนุภาคที่ต้องการแยก แรงกระทำระหว่างอนุภาคกับเยื่อแผ่น ตลอดจนสภาพการดำเนินงาน เป็นต้น

เมื่อการกรองดำเนินไป สารที่มีโมเลกุลใหญ่ซึ่งไม่สามารถผ่านรูพรุนของเยื่อแผ่นไปได้ จะสะสมอยู่บนผิวเยื่อแผ่น ทำให้ความเข้มข้นของอนุภาคที่ผิวเยื่อแผ่น (C_s) มีค่ามากกว่าความเข้มข้นในสายป้อน (C_b) (รูปที่ 3.2) จึงมีการแพร่กลับในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางการกรอง เนื่องจากความเข้มข้นที่แตกต่าง (Concentration Different) ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (Concentration Polarization)

ถ้าความเข้มข้นมีค่าสูงจนทำให้สิ่งกรองติดกัน (C_g) คล้ายเจลที่บริเวณผิวเยื่อแผ่น จะทำให้ความต้านทานการกรองเพิ่มขึ้น ฟลักซ์จะลดลงอย่างรวดเร็ว ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า เจลโพลาไรเซชัน (Gel Polarization) ค่าความเข้มข้นที่ทำให้เกิดชั้นเจลจะขึ้นกับตัวแปรหลายตัว เช่น ความดัน อุณหภูมิ ค่าการละลาย ความเป็นกรด-ด่าง เป็นต้น โดยชั้นเจลที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้ไม่สามารถเกิดการกรองได้ เนื่องจากชั้นเจลเปรียบเสมือนเยื่อแผ่นชั้นที่สองที่มีค่าความต้านทานการกรองสูงมาก



รูปที่ 3.2 แสดงความเข้มข้นที่ผิวเยื่อแผ่น

3.1.1 อิทธิพลที่ส่งผลต่อฟลักซ์การกรอง

ก. ความเข้มข้นในสายป้อน

$$J = (D/\delta) \ln(C_s/C_b) \quad (3.1)$$

โดย J คือ ฟลักซ์การกรอง (มิลลิลิตรต่อตารางเซนติเมตร-นาที่)

D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของอนุภาคแขวนลอย (ตารางเซนติเมตรต่อนาที่)

C_b คือ ความเข้มข้นของอนุภาคแขวนลอยด้านสายป้อน (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)

C_s คือ ความเข้มข้นของอนุภาคแขวนลอยที่ผิวของเยื่อแผ่น (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)

δ คือ ความหนาของชั้นขอบเขต (เซนติเมตร)

จากสมการจะเห็นว่า เมื่อความเข้มข้นของสารป้อน (C_b) เพิ่มมากขึ้น ค่าฟลักซ์การกรองจะมีค่าลดลง

ข. ความดัน (Transmembrane Pressure)

$$J = \Delta P_{TM} / \mu (R_M + R_C + R_P) \quad (3.2)$$

- โดย R_M คือ ความต้านทานการกรองของเยื่อแผ่น (ต่อเซนติเมตร)
 R_C คือ ความต้านทานการกรองของอนุภาคที่สะสมบนผิวเยื่อแผ่น (ต่อเซนติเมตร)
 R_P คือ ความต้านทานเนื่องจากการอุดตันภายในรูพรุนของเยื่อแผ่น (ต่อเซนติเมตร)

$$\Delta P_{TM} = (P_i + P_o) / 2 - P_f \quad (3.3)$$

- โดย P_i คือ ความดันขาเข้า (กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร)
 P_o คือ ความดันขาออก (กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร)
 P_f คือ ความดันด้านเพอมีเอท (กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร)

จากสมการที่ 3.2 จะเห็นว่าเมื่อค่า ΔP_{TM} มีค่าเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ค่าฟลักซ์การกรองมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย แต่อย่างไรก็ตาม การเพิ่มค่าความดันนี้ก็มีข้อจำกัด เพราะเมื่อเพิ่ม ΔP_{TM} มากขึ้น ก็จะทำให้ค่า R_C มากขึ้นด้วย ซึ่งจะทำให้ค่าฟลักซ์การกรองมีค่าลดลง

ค. ความเร็วในสายป้อน (Feed Flow Velocity)

การเพิ่มความเร็วในระบบจะเป็นการเพิ่มค่าแรงเฉือนบริเวณผิวหน้าของเยื่อแผ่น ทำให้ความหนาและความต้านทานการกรองของอนุภาคบนผิวเยื่อแผ่นมีค่าลดลง ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นฟลักซ์จึงมีค่าเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มความเร็วในสายป้อนสูงเกินไปก็อาจไปทำลายอนุภาคโดยเฉพาะถ้าเป็นจุลินทรีย์อาจสูญเสียคุณสมบัติได้

3.1.2 ค่าความสามารถในการเก็บกักของเยื่อแผ่น (Rejection)

ค่าความสามารถในการเก็บกักของเยื่อแผ่น คือ ค่าที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการเก็บกักอนุภาคบนผิวเยื่อแผ่น สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$R = \sigma \times 100\% \quad (3.4)$$

โดย R คือ เปอร์เซ็นต์ในการเก็บกักของเยื่อแผ่น

σ คือ สัมประสิทธิ์ในการเก็บกักของเยื่อแผ่น

โดยที่

$$\sigma = 1 - C_p / C_b \quad (3.5)$$

โดย C_p คือ ความเข้มข้นของอนุภาคแขวนลอยด้านเพอมีเอท (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)

C_b คือ ความเข้มข้นของอนุภาคแขวนลอยด้านบ่อน (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)

ถ้าเยื่อแผ่นมีความสามารถในการเก็บกักสูง ค่าความเข้มข้นด้านเพอมีเอทจะมีค่าใกล้เคียงศูนย์ ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ในการเก็บกักจะมีค่าประมาณ 1 นั่นคือค่ารีเจคชันมีค่าเท่ากับ 100%

3.2 เครื่องกรองระดับอนุภาคชนิดต่างๆ

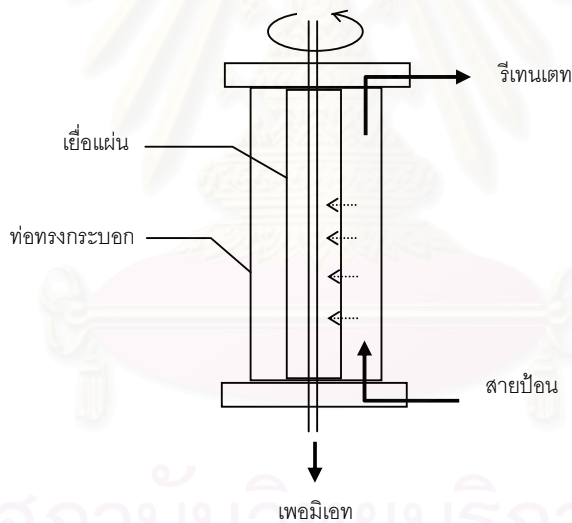
เครื่องกรองระดับอนุภาคมีหลายแบบตามลักษณะของเยื่อแผ่น เครื่องกรองที่นิยมใช้ได้แก่

1. แบบแผ่น (Plate and Frame Module) ประกอบด้วยเยื่อแผ่นหลายแผ่นวางซ้อนกัน โดยใช้แผ่นรองคั่นระหว่างชั้น เพื่อช่วยการกระจายตัวของสายบ่อนให้เคลื่อนที่ทั่วทั้งเยื่อแผ่น
2. แบบท่อม้วน (Spiral Wound Module) อุปกรณ์จะประกอบด้วยแผ่นรอง เยื่อแผ่น แผ่นรวบรวมเพอมีเอท และแผ่นกั้นระหว่างชั้น วางซ้อนกันและม้วนเข้าหาแกนท่อซึ่งเจาะรูเพื่อรับเพอมีเอท สารละลายจะถูกบ่อนภายใต้ความดันผ่านเข้าทางแผ่นรองซึ่งติดอยู่กับเยื่อแผ่น ส่วนที่สามารถผ่านเยื่อแผ่นจะถูกรวบรวมไปยังแกนท่อ โดยแต่ละส่วนจะไม่ผสมกันเนื่องจากมีแผ่นกั้นระหว่างชั้น ส่วนรีเทนเตทจะไหลออกอีกด้านหนึ่งของอุปกรณ์

3. แบบท่อ (Tubular Module) เยื่อแผ่นที่ใช้นิยมขึ้นรูปจากเซรามิค ส่วนมากภายในจะประกอบด้วยท่อหลายท่อมารวมกันเพื่อเพิ่มพื้นที่ในการกรอง จึงต้องมีการป้องกันการรั่วไหลอย่างดี
4. แบบเส้นใยกลวง (Hollow Fiber Module) เยื่อแผ่นชนิดนี้ผลิตจากพอลิเมอร์ มีลักษณะเป็นท่อขนาดเล็กจำนวนมากมาจัดรวมกัน

3.3 เครื่องกรองระดับอนุภาคแบบท่อหมุน

สำหรับเครื่องกรองที่จะใช้ในงานวิจัยนี้เป็นชนิดท่อที่หมุนได้จึงขอกล่าวรายละเอียดเพิ่มเติมในหัวข้อนี้ เครื่องกรองแบบนี้มีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ เยื่อแผ่นที่ติดอยู่กับแกนที่สามารถหมุนได้ (Rotor) มีท่อทรงกระบอกครอบเยื่อแผ่นเพื่อให้เป็นทางไหลผ่านของสาร มอเตอร์ที่ใช้ในการหมุนเยื่อแผ่นและปั๊มเพื่อให้แรงขับป้อนแก่สารละลายดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ไดอะแกรมแสดงลักษณะเครื่องกรองชนิดท่อหมุนได้

ลักษณะการทำงานของเครื่องกรองคือ สารละลายแขวนลอยด้านสารป้อนจะถูกป้อนเข้าทางด้านล่างของเครื่องกรอง ไหลผ่านด้วยแรงขับดันจากปั๊ม ส่วนอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของเยื่อแผ่นจะไหลผ่านเยื่อแผ่นสู่ส่วนกลางของเยื่อแผ่นแล้วไหลออกสู่ท่อทางด้านล่างของเครื่อง ส่วนอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเยื่อแผ่น จะไหลผ่านช่องว่างระหว่างเยื่อแผ่นกับท่อทรงกระบอกแล้วไหลออกสู่ทางออกที่ด้านบนของเครื่องกรอง

เครื่องกรองชนิดนี้จะมีอัตราการกรองที่สูงกว่าเครื่องกรองแบบท่อชนิดที่ไม่หมุน โดยอาศัยหลักการหมุนวนของสารละลายของเทย์เลอร์ (Taylor Vortice) การหมุนวนของสารละลายนี้จะก่อให้เกิดแรงเฉือนตลอดผิวหน้าของเยื่อแผ่น ทำให้อนุภาคที่เกาะที่ผิวของเยื่อแผ่นลดลง ลดการอุดตันของเยื่อแผ่น ทำให้รอบการทำงาน of เครื่องกรองนานขึ้นด้วย

โดยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของเยื่อแผ่น สามารถคำนวณได้ ดังสมการ

$$\tau = 0.23\sqrt{T_a} \frac{\omega R_1}{\Delta} \quad (3.6)$$

โดย τ คือ อัตราเฉือน (Effective Shear Rate) (ต่อวินาที)
 T_a คือ ค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์ (Taylor Number) (-)
 ω คือ ค่าความเร็วเชิงมุม = $2\pi n$ (เรเดียนต่อวินาที)
 R_1 คือ รัศมีภายนอกของเยื่อแผ่น (เซนติเมตร)
 R_2 คือ รัศมีภายในของท่อทรงกระบอกที่อยู่กับที่ (เซนติเมตร)
 Δ คือ ความกว้างของช่องว่างระหว่างผนังทรงกระบอกกับผนังเยื่อแผ่นด้านนอกโดยมีค่าเท่ากับ $R_2 - R_1$ (เซนติเมตร)

สามารถคำนวณค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์ (T_a) ได้จากสมการเทย์เลอร์ ดังนี้

$$T_a = \frac{\omega R_1 \Delta}{\nu} \left[\frac{2\Delta}{R_1 + R_2} \right]^{0.5} \quad (3.7)$$

โดย T_a คือ ค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์ (-)
 ω คือ ความเร็วเชิงมุม = $2\pi n$ (เรเดียนต่อวินาที)
 ν คือ ความหนืดคินเนมาติก (ตารางเซนติเมตรต่อวินาที)
 n คือ ความเร็วรอบการหมุนของเยื่อแผ่น (รอบต่อวินาที)

โดยที่ $T_a < T_{a,crit}$ จะมีลักษณะการไหลแบบราบเรียบ (Laminar) เพียงอย่างเดียว

$$T_{a,crit} = 41.3 + 13.1 \Delta / R_1 \quad (3.8)$$

เราสามารถแบ่งลักษณะการไหลโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์กับลักษณะการหมุนวนของเทย์เลอร์ภายในช่องว่างระหว่างผนังท่อทรงกระบอกด้านในกับผนังเยื่อแผ่นด้านนอกได้ดังนี้

การไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow)	$T_a < T_{a,crit}$
การหมุนวนแบบราบเรียบ (Laminar Vortex Flow)	$T_{a,crit} < T_a < 800$
ช่วงการเปลี่ยนแปลงการไหล (Transition Flow)	$800 < T_a < 2000$
การหมุนวนแบบปั่นป่วน (Turbulent Vortex Flow)	$2000 < T_a < 15000-15000$
การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow)	$T_a > 15000$

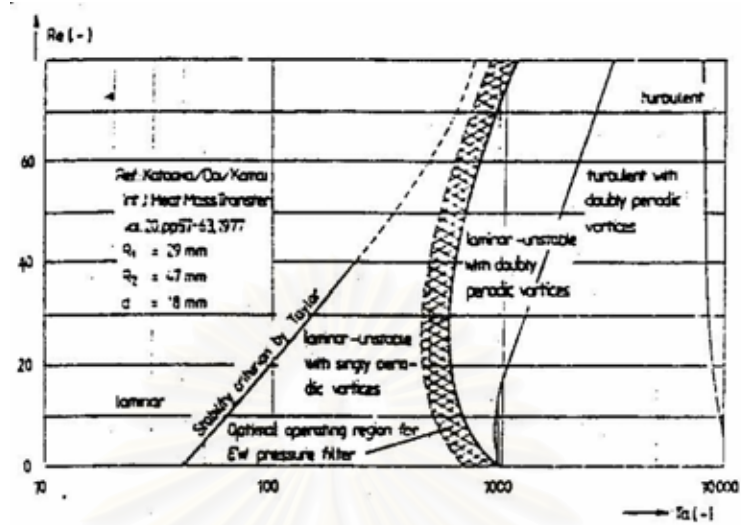
เราสามารถแบ่งลักษณะการไหลได้จากรูปที่ 3.4 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์และค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ซึ่งค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynold Number) ที่เกี่ยวข้องกับการไหลของสารละลายที่กรองด้วยเครื่องกรองชนิดเยื่อแผ่นหมุนได้ ได้แก่ ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ตามแนวแกนและค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เนื่องจากการหมุนของเยื่อแผ่น (Tangential Reynold Number) ซึ่งค่าทั้งสองสามารถคำนวณได้จาก

$$Re_a = \frac{v d_h}{\nu} \quad (3.9)$$

$$Re_t = \frac{\omega R_t d_h}{\nu} \quad (3.10)$$

- โดย Re_a คือ ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ตามแนวแกน (-)
 Re_t คือ ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เนื่องจากการหมุนของเยื่อแผ่น (-)
 v คือ ความเร็วของสารละลายตามแนวแกน (เซนติเมตรต่อวินาที)
 d_h คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกมีค่าเท่ากับ $2A$ (เซนติเมตร)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.4 กราฟแสดงขอบเขตของการเกิดการหมุนวนของเทย์เลอร์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ทฤษฎีเกี่ยวกับคลื่นเหนือเสียง

คลื่นเหนือเสียง คือ เสียงที่มีความถี่สูงกว่ามนุษย์ได้ยิน โดยทั่วไปมนุษย์จะได้ยินเสียงในช่วง 16 เฮิรตซ์ – 16 กิโลเฮิรตซ์ คลื่นเหนือเสียงที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์จะมีความถี่อยู่ในช่วง 18 กิโลเฮิรตซ์ - 500 เมกกะเฮิรตซ์ การนำไปใช้งานจะสามารถแบ่งได้เป็น 2 ช่วงความถี่ คือ

1. ช่วงความถี่สูง (1-10 เมกกะเฮิรตซ์) มีการประยุกต์ใช้ในการวินิจฉัยและการรักษาทางการแพทย์ เช่น การตรวจอัลตราซาวด์ทารกในครรภ์มารดา
2. ช่วงความถี่ต่ำ (20-100 กิโลเฮิรตซ์) มีการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ เช่น อุปกรณ์ทำความสะอาด กระบวนการแตกเซลล์ (Break Cell) การเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น

คลื่นเหนือเสียงเป็นคลื่นตามยาว (Longitudinal Wave) คือ การเคลื่อนที่ที่จะอาศัยตัวกลางในการถ่ายเทพลังงาน โดยอนุภาคตัวกลางจะสั่นไปมาหรือย้ายตำแหน่งในแนวเดียวกับทิศทางการเคลื่อนที่ของ พลังงานการเคลื่อนที่ของคลื่น (Propagation of Wave) ไปในตัวกลางของเหลว จะทำให้เกิดการสั่นสะเทือน (Vibrate หรือ Oscillate) เกิดเป็นส่วนอัด (Compression) และส่วนขยาย (Rarefaction) สลับไปมาแพร่กระจายในตัวกลาง บริเวณผิวหน้าของของเหลวจะถูกอัด ทำให้ความหนาแน่นและความดันของของเหลวมากขึ้น เกิดการชนกันของโมเลกุลบริเวณนี้มาก ส่งผลให้เกิดการกดของของเหลวในชั้นถัดไปเรื่อยๆ และบริเวณที่ถูกกดตอนแรกจะกลับมามีสภาพเดิม เมื่ออยู่ในส่วนขยายจะทำให้ความดันและความหนาแน่นลดลง ส่วนอัดและส่วนขยายนี้จะเดินทางด้วยความเร็วค่าหนึ่งขึ้นกับความหนาแน่นและค่าสัมประสิทธิ์การยืดหยุ่น (Compressibility Coefficient) ของสารที่เป็นตัวกลาง

4.1 ปรากฏการณ์จากการเคลื่อนที่ของคลื่นเหนือเสียงในตัวกลาง

การเคลื่อนที่ของคลื่นเหนือเสียงผ่านตัวกลางที่เป็นของเหลว จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ใหญ่ๆ 2 ปรากฏการณ์ คือ

1. เกิดการเคลื่อนที่ของของเหลวอย่างรวดเร็ว เนื่องจากกระยะห่างเฉลี่ยของโมเลกุลน้อยกว่าระยะที่โมเลกุลข้างเคียงวิ่งมาชน ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของของเหลวขึ้น

2. ทำให้เกิดฟอง (Cavitation) ขึ้นในตัวกลางของเหลว โดยฟองเริ่มต้นส่วนใหญ่เกิดจากอากาศหรือก๊าซที่อยู่ในตัวกลางหรืออากาศที่เกาะอยู่ตามผิวที่ขรุขระของผิวภาชนะจะถูกพลังงานของคลื่นเหนือเสียงในส่วนขยายซึ่งมากพอที่จะเอาชนะแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของของเหลว ทำให้ระยะห่างระหว่างโมเลกุลเพิ่มสูงขึ้นและแตกออก (Break Down) จากกัน เกิดเป็นฟองเล็กๆ (Microbubble) ขึ้นเป็นจำนวนมาก มีลักษณะเช่นเดียวกับการลดความดันจนทำให้ที่อุณหภูมิปกติของเหลวสามารถเดือดเป็นไอขึ้นได้ปรากฏการณ์นี้เรียกว่าคาวิเทชัน (Cavitation) ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

- 2.1 ฟองแบบคงตัว (Stable Microbubble) จะเกิดขึ้นในสภาวะที่ความถี่และความเข้มของเสียงเหมาะสมกับคุณสมบัติทางกายภาพของสารละลาย ฟองมีขนาดค่อนข้างคงที่ตลอดไม่มีการเปลี่ยนแปลงหลายช่วงคลื่น
- 2.2 ฟองแบบชั่วคราว (Transient Microbubble) ฟองจะมีขนาดใหญ่ขึ้นในส่วนขยายของคลื่นและยุบตัวอย่างรวดเร็วในส่วนอัด การยุบตัวนี้จะทำให้เกิดเป็นฟองเล็กๆซึ่งเป็นจุดเริ่มต้น (Nuclei) สำหรับการเกิดฟองต่อไปและทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความดันอย่างรวดเร็ว (Shock Wave) การยุบตัวของฟองนี้จะเกิดขึ้นในเวลาอย่างรวดเร็วมากในระดับนาโนวินาที นอกจากนั้นทางทฤษฎีสามารถคำนวณอุณหภูมิและความดัน ณ จุดที่ฟองประเภทนี้ยุบตัวได้สูง 5000 เคลวิน และความดันประมาณ 100 เมกกะปาสคาล

ในทางทฤษฎีสามารถคำนวณค่าอุณหภูมิสูงสุด (T_{max}) และความดันสูงสุด (P_{max}) ที่เกิดขึ้นภายในคาวิเทชัน ณ ขณะที่เกิดการยุบตัวได้จากสมการต่อไปนี้

$$T_{max} = T_0 [P_m (K-1)/P] \quad (4.1)$$

$$P_{max} = P [P_m (K-1)/P]^{K/(K-1)} \quad (4.2)$$

โดยที่ T_0 คือ อุณหภูมิของของเหลว (เคลวิน)
 K คือ ค่าโพลีโทรปิกอินเด็ก (Polytropic Index) ของก๊าซ (-)
 P คือ ความดันภายในคาวิเทชัน เมื่อมีขนาดใหญ่ที่สุด โดยทั่วไปมีค่าเท่ากับ P_v ของของเหลว ซึ่งถ้าภายในคาวิเทชันมีก๊าซบรรจุอยู่ P จะมีค่าเท่ากับ $P_v + P_g$ (กิโลปาสคาล)
 P_m คือ ความดันภายในคาวิเทชันของของเหลว ณ เวลาที่เกิดการยุบตัวของฟอง โดยทั่วไปมีค่าเท่ากับ $P_h + P_a$ (กิโลปาสคาล)

P_v	คือ ความดันไอภายในคาวีเทชัน (กิโลปาสคาล)
P_g	คือ ความดันของก๊าซภายในคาวีเทชัน (กิโลปาสคาล)
P_h	คือ ความดันของของเหลวเนื่องจากแรงกดของน้ำ (กิโลปาสคาล)
P_a	คือ ความดันของคลื่นเหนือเสียง (กิโลปาสคาล)

จากการคำนวณ ค่าอุณหภูมิสูงสุดและความดันสูงสุด ที่เกิดขึ้นจากการยุบตัวของคาวีเทชัน แบบชั่วคราวนี้มีค่าสูงได้ในอันดับของหลายพันเคลวินและหลายร้อยความดันบรรยากาศ ตามลำดับ

ค่าแอมพลิจูดของคลื่นเสียงต่ำสุดที่ต้องการเพื่อทำให้เกิดฟองเหล่านี้ได้ เรียกว่า คาวีเทชันเทรชโฮลด์ (Cavitation Threshold) ค่านี้ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์หลายตัว อาทิเช่น ค่าความหนืดของของเหลว, อุณหภูมิ, ความถี่ และการที่มีของแข็งหรือก๊าซปรากฏอยู่ในของเหลว เป็นต้น การที่มีฟองอากาศเล็กๆ ปรากฏในของเหลวนั้นจะช่วยทำให้เกิดคาวีเทชันได้ง่ายขึ้น นั่นคือ ค่าคาวีเทชันเทรชโฮลด์มีค่าลดลง ดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ฟองเหล่านี้จะกลายเป็นคาวีเทชันแบบคงตัวหรือคาวีเทชันแบบชั่วคราวขึ้นอยู่กับขนาดเริ่มต้นของฟองหรือถ้าฟองเริ่มต้นมีขนาดเล็กเกินไปก็ไม่สามารถโตได้ก็จะหดตัวเล็กลงและในที่สุดก็ละลายไปในของเหลว ฟองบางชนิดที่มีขนาดระหว่างที่จะเป็นได้ทั้งคาวีเทชันแบบคงตัวหรือแบบชั่วคราว ก็อาจเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า เรกติฟายด์ดิฟฟิวชัน (Rectified Diffusion) ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดเพิ่มขึ้นและลดลงตามจังหวะของความดันของคลื่นที่ผ่านไป โดยมีแนวโน้มที่จะโตขึ้นเรื่อยๆ จนในที่สุดกลายเป็นคาวีเทชันแบบชั่วคราวโดยจะลอยขึ้นสู่ผิวน้ำออกสู่อากาศภายนอกในที่สุด ปรากฏการณ์นี้สามารถนำไปใช้ได้ใน การไล่ก๊าซ (Degassing) ออกจากระบบนั่นเอง

4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อความยากง่ายในการเกิดคาวีเทชัน

1) ก๊าซและอนุภาคของแข็งที่ปรากฏในของเหลว

การที่มีก๊าซหรืออนุภาคของแข็งปรากฏในของเหลวจะเป็นจุดอ่อนของโครงสร้างของของเหลวนั้น ทำให้ค่าแรงดึง (Tensile Strength) ของของเหลวลดลง ทำให้ค่าคาวีเทชันเทรชโฮลด์ลดลง ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น กรณีที่มีก๊าซปรากฏในของเหลวจะทำให้ความรุนแรงเนื่องจากการยุบตัวของคาวีเทชันที่เกิดขึ้นมีค่าลดลง เนื่องจากก๊าซจะทำหน้าที่รับแรงกระแทกของการเปลี่ยนแปลงแรงดันอย่างรวดเร็ว (Shock Wave) ที่เกิดขึ้น เนื่องจากก๊าซไม่สามารถแพร่ออกจากคาวีเทชัน ได้ในช่วงยุบตัวอันสั้นของคาวีเทชัน การยุบตัวจึงไม่สามารถเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ รวมทั้งยังทำให้ค่าอุณหภูมิและความดันสูงสุดที่เกิดขึ้นจากการยุบตัวของคาวีเทชันมีค่าลดลง ดัง

สมการ (4.2) และ (4.3) ซึ่งค่า P มีค่าเท่ากับ $P_v + P_g$ ดังนั้นความรุนแรงเนื่องจากการยุบตัวของ คาวีเทชันที่เกิดขึ้นจึงลดลงด้วย

2) ความดันภายในของเหลว

การเพิ่มความดันภายในของเหลว ส่งผลทำให้จุดกำเนิดฟองบางส่วนอาจจะยุบตัวลง จนละลายเข้าไปในของเหลว จำนวนของจุดกำเนิดจึงมีน้อยลง นอกจากนั้นแล้วการเพิ่มความดันในระบบ จะทำให้ฟองอากาศที่ติดอยู่บริเวณผิวของของแข็งมีขนาดเล็กลงและลักษณะโค้งเว้าเข้าข้างใน ทำให้ต้องการความดันของคลื่นสูงมากขึ้นที่จะเอาชนะแรงตึงผิวของของเหลวให้ฟอง อากาศเหล่านี้หลุดออกมาเป็นคาวีเทชันต่อไปได้ จึงทำให้ค่าคาวีเทชันเทรสโฮลด์มีค่าสูงขึ้น การ เกิดคาวีเทชันจึงยากขึ้นด้วย

อย่างไรก็ตาม การเพิ่มความดันภายในของเหลวจะทำให้ความรุนแรงเนื่องจากการ ยุบตัวของคาวีเทชันที่มากขึ้น จากสมการที่ (4.3) เนื่องจากค่า P_m เท่ากับ $P_h + P_a$ ดังนั้นเมื่อ P_h มีค่าสูงขึ้น จะทำให้ความดันสูงสุดที่เกิดขึ้นจากการยุบตัวของคาวีเทชันมีค่าสูงขึ้นด้วย นอกจาก นั้นแล้ว เวลาที่ใช้ยุบตัวของคาวีเทชันสามารถคำนวณได้จาก

$$\tau = 0.915 R_m (\rho / P_m)^{1/2} (1 + P_{vg} / P_m) \quad (4.3)$$

โดยที่ P_{vg} คือ ความดันของไอหรือก๊าซภายในคาวีเทชัน (กิโปลาสคาล)
 R_m คือ รัศมีของคาวีเทชันก่อนการยุบตัว (ไมโครเมตร)

ดังนั้นเมื่อ P_m มีค่ามากขึ้น τ จะลดลง ซึ่งหมายถึงจะทำให้การยุบตัวของคาวีเทชัน จะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วขึ้น ส่งผลให้ผลกระทบของคลื่นเสียงต่อระบบมีค่ามากขึ้นด้วยตามลำดับ

3) ความหนืดของของเหลว

เนื่องจากการเกิดคาวีเทชัน ค่าความดันของเสียงในช่วงขยายจะต้องเอาชนะแรงตึง ดูระหว่างโมเลกุลของของเหลว ดังนั้นถ้าค่าแรงตึงดูนี้มีค่าสูงขึ้นก็จะทำให้ค่าคาวีเทชันเทรส-โฮลด์มีค่าสูงขึ้นด้วย แรงตึงดูนี้จะเพิ่มขึ้นถ้าของเหลวมีความหนืดมากขึ้น ดังนั้นของเหลวที่มีค่า ความหนืดสูงจะทำให้เกิดคาวีเทชันได้ยากกว่าของเหลวที่มีค่าความหนืดต่ำกว่า

4) ความถี่ของคลื่นเหนือเสียง

จากที่กล่าวมาแล้วว่า การเกิดคาวิตีชันเนื่องจากการสูญเสียโครงสร้างของของเหลวในช่วงความดันขยายของคลื่นเหนือเสียง ซึ่งจะต้องใช้เวลาค่าหนึ่งทีเพียงพอจึงจะทำให้เกิดปรากฏการณ์นี้ ซึ่งหากว่าเวลาที่ต้องการนี้มีค่ามากกว่าช่วงเวลาในช่วงขยายของคลื่นซึ่งเป็นช่วงที่จะทำให้เกิดคาวิตีชัน คาวิตีชันก็จะไม่สามารถเกิดขึ้นได้ เนื่องจากมีเวลาไม่เพียงพอ $[f=1/T$ โดย f คือความถี่ของคลื่น (รอบต่อวินาทีหรือเฮิรตซ์) และ T คือคาบ (วินาที) โดยช่วงเวลาของความดันขยายมีค่าเท่ากับ $T/2$] ดังนั้นการเพิ่มความถี่ของคลื่นเสียงซึ่งหมายถึงการลดช่วงเวลาของความดันขยายจะทำให้เกิดคาวิตีชันยากขึ้นหรือคาวิตีชันเทรสโฮลด์มีค่ามากขึ้นนั่นเอง ดังนั้นค่าแอมพลิจูดของคลื่นเสียงที่ต้องใช้เพื่อให้เกิดฟองที่มีความถี่สูงๆก็ต้องมีค่าสูงขึ้น

สำหรับความรุนแรงเนื่องจากการยุบตัวของคาวิตีชันที่เกิดขึ้นที่ความถี่สูง คาบหรือเวลาของแต่ละรอบของคลื่นจะมีค่าสั้นลง ดังนั้นอาจจะไม่เพียงพอให้คาวิตีชันยุบตัวได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นค่าความดันสูงสุดที่เกิดขึ้นจากการยุบตัวของคาวิตีชันก็จะมีค่าน้อยกว่ากรณีการยุบตัวอย่างสมบูรณ์

5) อุณหภูมิ

โดยทั่วไปจะพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ค่าความหนืดของของเหลวมีค่าลดลง รวมทั้งค่าความดันไอ (Vapor Pressure) จะมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นจะส่งผลให้ค่าคาวิตีชันเทรสโฮลด์มีค่าลดลง นั่นคือ ที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น การเกิดคาวิตีชันจะง่ายขึ้นด้วย

เมื่อพิจารณาฟองเดี่ยวที่มีขนาด R_0 ในของเหลวที่มีความดันเนื่องจากแรงกดของน้ำ (Hydrostatic Pressure; P_h) ถ้าฟองนี้อยู่ในสมดุลแรงดันภายในฟองต้องมีค่าเท่ากับภายนอกที่ จะพยายามทำให้ฟองยุบตัว เขียนสมการสมดุลแรงได้ดังนี้

$$P_v + P_g = P_h + 2\sigma/R_0 \quad (4.4)$$

โดย σ คือ แรงตึงผิวของของเหลว

เมื่อมีคลื่นเหนือเสียงเดินทางผ่านของเหลวที่มีฟองนี้ ซึ่งมีขนาดความดัน (P_a) เท่ากับ $P_a \sin(2\pi f t)$ (P_a คือแอมพลิจูดของคลื่น) โดยมีค่าขึ้นกับเวลา ในระหว่างช่วงอัดของคลื่นค่า P_a จะมีค่าเป็นบวก ดังนั้นในระหว่างนี้ค่าความดันในของเหลวจะเพิ่มขึ้นจาก P_h เป็น $P_h + P_a$ และในระหว่างช่วงขยายของคลื่น ค่า P_a จะมีค่าเป็นลบ ดังนั้นค่าความดันในของเหลวจะเท่ากับ $P_h - P_a$ สมการ (4.4) จึงเขียนใหม่ได้ว่า

$$P_v + P_g = P_h \pm P_a + 2\sigma/R_o \quad (4.5)$$

ถ้าสมมติว่าค่า P_g และ σ มีค่าน้อยมากจนละทิ้งได้

$$P_v = P_h \pm P_a \quad (4.6)$$

จากสมการ (4.6) จะเห็นว่า ถ้า P_v มีค่ามากกว่าค่าน้อยที่สุดที่เกิดขึ้นเมื่อคลื่นเสียงอยู่ในช่วงขยาย ซึ่งทำให้เทอมขวามือมีค่าน้อยที่สุดคือเท่ากับ $P_h - P_a$ คาวิตะชันนี้จะมีขนาดโตขึ้นเนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิ จะทำให้ค่า P_v ของของเหลวเพิ่มขึ้น ดังนั้นคาวิตะชันจะสามารถโตได้ง่ายขึ้น จึงเป็นการเพิ่มผลกระทบของคลื่นเหนือเสียงต่อระบบด้วย ในอีกทางหนึ่ง การเพิ่มขนาดของแอมพลิจูดของคลื่นหรือ P_A ก็จะทำให้เกิดคาวิตะชันได้ง่ายที่อุณหภูมิต่ำลง หากเราพิจารณา ค่าของแรงตึงผิว σ จะได้ว่า

$$P_v - (2\sigma/R_o) = P_h - P_a \quad (4.7)$$

โดยทั่วไปการเพิ่มอุณหภูมิ จะทำให้ค่าแรงตึงผิวของของเหลวมีค่าลดลง ดังนั้นจะทำให้คาวิตะชันสามารถโตได้ง่ายขึ้น หรือค่าคาวิตะชันเทรชโฮลด์ลดลงนั่นเอง

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาสมการ (4.1) จะพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิ ซึ่งจะส่งผลให้ค่า P_v สูงขึ้น จะทำให้อุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นจากการยุบตัวของคาวิตะชันมีค่าลดลง

6) ความเข้มของคลื่นเหนือเสียง

โดยทั่วไปการเพิ่มความเข้มของเสียง คือการเพิ่มค่า P_A ซึ่งจะทำให้ความดันและอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดจากการยุบตัวของคาวิตะชัน รวมทั้งเวลาที่ใช้ในการยุบตัวของคาวิตะชันมีค่าสูงขึ้นด้วย ดังสมการ (4.1), (4.2) และ (4.3) ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการเพิ่มความเข้มของคลื่นเหนือเสียงก็มีขีดจำกัด เนื่องจากขนาดของฟองที่ใหญ่ที่สุด R_{max} มีค่าขึ้นอยู่กับแอมพลิจูดของคลื่นเหนือเสียงด้วย ดังสมการ

$$R_{max} = (4/3\omega) \times (P_a - P_h) \times (2/\rho P_a)^{1/2} [1 + 2(P_a + P_h)/(3P_h)]^{1/3} \quad (4.8)$$

ถ้าขนาดของแอมพลิจูดสูงมากเกินไปอาจจะทำให้ขนาดของคาวิตะชันมีขนาดใหญ่มาก ซึ่งต้องการเวลาในการยุบตัวสูงขึ้น จึงอาจทำให้คาวิตะชันไม่สามารถยุบตัวได้อย่างสมบูรณ์

ภายในช่วงเวลาความดันขยายของคลื่น 1 รอบ ดังนั้นจึงทำให้ความรุนแรงเนื่องจากการยุบตัวของคาเวทั้นจึงน้อยลง การเลือกค่าความเข้มของคลื่นเหนือเสียงที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญต่อผลที่ได้รับ จึงเป็นตัวแปรที่สำคัญตัวหนึ่งในการพิจารณาการใช้คลื่นเหนือเสียง

4.3 ตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง (Ultrasonic Transducer) คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานจากรูปหนึ่งไปเป็นพลังงานคลื่นเหนือเสียง ตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง มี 2 ชนิดใหญ่ๆ ดังนี้

1. เมคคานิคัลทรานสดิวเซอร์ (Mechanical Transducer) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานการเคลื่อนที่ของของไหลไปเป็นพลังงานคลื่นเหนือเสียง สามารถสร้างคลื่นเหนือเสียงให้มีความถี่สูงสุด 100 กิโลเฮิรตซ์
2. อิเลคโตรเมคคานิคัลทรานสดิวเซอร์ (Electromechanical Transducer) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานเสียง เช่น การใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetostatic Oscillators) และ เพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ (Piezoelectric Transducer) ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนความถี่ได้ในช่วงกว้างมาก

การใช้เพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ ในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานเสียง จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงชนิดอื่น การส่งพลังงานเป็นระเบียบ มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน ง่ายต่อการปฏิบัติงานและการควบคุม และยังสามารถประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์อื่นๆ ได้มากมาย ดังนั้นจึงขอกกล่าวเฉพาะเพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ (Piezoelectric Transducer) ซึ่งจะนำมาใช้ในงานวิจัยนี้เท่านั้น

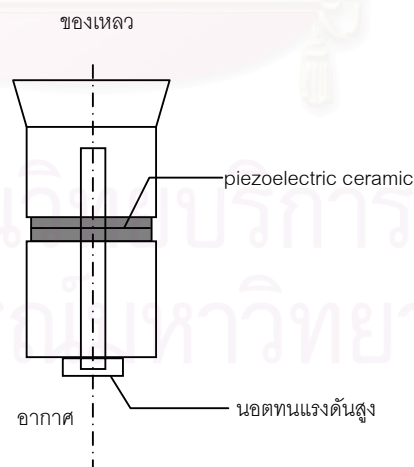
อุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตคลื่นเหนือเสียง ประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก 2 ส่วน คือ

1. เครื่องให้สัญญาณความถี่ไฟฟ้า (Electrical Generator) จะทำหน้าที่ผลิตสัญญาณความถี่ไฟฟ้าตามที่ต้องการ
2. ตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง (Ultrasonic Transducer) จะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล โดยใช้หลักการเพียโซอิเล็กทริคซิตี (Piezoelectricity) คือ การให้โครงสร้างผลึกมีการจัดเรียงตัวของไดโพล (Electric Dipole) อย่างเป็นระเบียบเมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอกทำให้เกิดประจุไฟฟ้าขึ้น และมีคุณสมบัติเป็นตัวเก็บประจุ (Capacitor)

การทำให้โมเลกุลมีการจัดเรียงตัวของประจุเป็นโครงร่างผลึกในทิศทางเดียวกันทำได้โดยการให้ความร้อนแก่วัสดุที่มีคุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Material) จนถึงอุณหภูมิระดับหนึ่งซึ่งเรียกว่า อุณหภูมิคูรี (Curie Temperature) จะทำให้ไดโพลเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ที่จุดนี้จะได้ศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปและลดอุณหภูมิลง ทำให้โมเลกุลมีการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันดังนั้นหากนำมาใช้งานในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงกว่า อุณหภูมิคูรี จะทำให้เสียคุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) ของวัสดุไป วัสดุที่มีคุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริกที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติได้แก่ ผลึกควอตซ์ (Quartz) ผลึกเกลือ หรือพลอยสีต่างๆ ปัจจุบันมีการพัฒนานำเอาเซรามิกมาใช้แทน เนื่องจากขึ้นรูปง่าย เชื้อยต่อปฏิกิริยา ควบคุมคุณสมบัติได้ แข็งแรง ราคาถูก ทนต่อแรงกดดันได้สูง

ตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงพลังงานสูง

อย่างไรก็ตามเนื่องจากการใช้เพียโซอิเล็กทริกเซรามิก (Piezoelectric Ceramic) มีข้อจำกัดในการใช้งาน และในการผลิตคลื่นเหนือเสียงที่มีพลังงานสูง จึงต้องนำมาปรับปรุงโดยสร้างเป็นอุปกรณ์ ที่เรียกว่าแซนด์วิชทรานสดิวเซอร์ (Sandwich Transducer) หรือคอมโพสิททรานสดิวเซอร์ (Composite Transducer) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงพลังงานสูง เนื่องจากมีโครงสร้างง่ายและให้ประสิทธิภาพสูง ประกอบด้วยเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก (Piezoelectric Ceramic) 2 ชั้น และโลหะ 2 ชั้น ยึดเข้ากันด้วยนอตทนแรงดันสูง ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 4.1 แสดงตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงความเข้มสูง

ในการออกแบบนี้ต้องเลือกชนิดของโลหะและเซรามิกให้เหมาะสมเพื่อที่จะสามารถส่งผ่านพลังงานไปยังตัวกลางที่ต้องการได้มากที่สุด โดยจะต้องกำหนดความถี่ที่ต้องการก่อน แล้วจึงคำนวณหาความยาวของคลื่นเหนือเสียง

สำหรับโลหะที่ส่งผ่านคลื่นเหนือเสียง แบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่จะส่งผ่านพลังงานไปยังตัวกลางที่ต้องการและส่วนด้านหลังซึ่งไม่ต้องการให้พลังงานถูกส่งผ่านไปยังอากาศที่สัมผัสอยู่ สำหรับส่วนด้านหน้าจะเลือกโลหะที่มีค่าอะคูสติกอิมพีแดนซ์ (Acoustic Impedance) อยู่ระหว่างค่าของเซรามิกและของเหลว เพื่อให้พลังงานสามารถส่งผ่านไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยค่าอะคูสติกอิมพีแดนซ์ของโลหะด้านหน้าสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Z_{\text{metal}} = (Z_{\text{ceramic}} \times Z_{\text{liquid}})^{1/2} \quad (4.9)$$

ส่วนด้านหลังจะเลือกโลหะที่มีค่าอะคูสติกอิมพีแดนซ์สูง เนื่องจากอะคูสติกอิมพีแดนซ์ของอากาศมีค่าน้อยมาก ดังนั้นถ้าค่าอะคูสติกอิมพีแดนซ์มีค่าแตกต่างกันมาก พลังงานจะเกิดการสะท้อนกลับมาทั้งหมดและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะด้านนี้จะพยายามให้มีขนาดเล็กเพื่อลดปริมาณพลังงานที่จะส่งผ่านไปยังอากาศ ดังนั้นสามารถสร้างตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงที่มีการส่งผ่านพลังงานด้านอากาศน้อยมากเมื่อเทียบกับด้านที่สัมผัสกับตัวกลางของเหลว และการสร้างตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง ในขั้นต้นจะต้องกำหนดความถี่ที่ต้องการก่อน แล้วจึงคำนวณหาความยาวคลื่น โดยทั่วไปความยาวทั้งหมดของตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงพลังงานสูงที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น

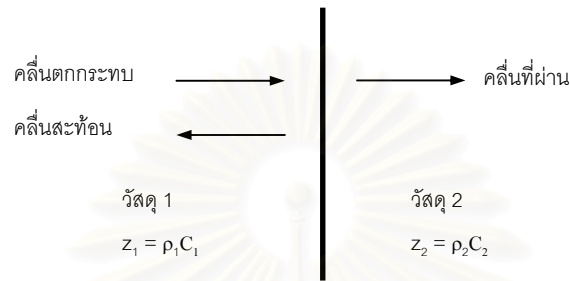
เมื่อคลื่นเหนือเสียงเดินทางผ่านพื้นหน้าที่มีคุณสมบัติเชิงกลต่างกันจะสะท้อนกลับมาและเกิดปรากฏการณ์เดียวกันแต่ในทิศทางตรงข้าม ความแรงของคลื่นเหนือเสียงที่สะท้อนกลับจะขึ้นอยู่กับค่าอะคูสติกอิมพีแดนซ์ของเนื้อวัสดุซึ่งเท่ากับผลคูณของความหนาแน่นและความเร็วของคลื่นเหนือเสียงในตัวกลางนั้น

$$Z = \rho c \quad (4.10)$$

โดยค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Pressure Reflection Coefficient) คือ อัตราส่วนระหว่างส่วนที่สะท้อนกลับ (Reflected Pulse) ต่อส่วนที่ตกกระทบ (Incidence Pulse) รูปที่ 4.7 ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ

$$R = (Z_2 - Z_1)/(Z_2 + Z_1) \quad (4.11)$$

การสะท้อนของคลื่นจะมีความแตกต่างกันเมื่อไปกระทบพื้นหน้าที่มีลักษณะแตกต่างกัน เมื่อคลื่นเสียงกระทบพื้นหน้าที่ตั้งฉากกันจะได้คลื่นที่สะท้อนกลับมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกรณีนี้ที่คลื่นตกกระทบพื้นเอียงหรือพื้นผิวขรุขระกรณีที่เป็นวัสดุเดียวกัน ซึ่งจะทำให้การสะท้อนกลับของคลื่นมีค่าน้อยกว่า



รูปที่ 4.2 การสะท้อนของคลื่นเหนือเสียง

สามารถคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่ตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงได้จาก

$$P = VI \cos \theta \quad (4.12)$$

- โดย P คือ กำลังไฟฟ้าที่ป้อน (วัตต์)
 V คือ ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง (โวลต์)
 I คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจร (แอมแปร์)
 θ คือ เฟสที่แตกต่างระหว่างความต่างศักย์กับกระแสที่ไหลในวงจร (องศา)

ถ้ากำหนดให้ไม่มีการสูญเสียพลังงาน ค่าความเข้มเสียงที่ได้รับสามารถคำนวณได้จาก

$$I = P/A \quad (4.13)$$

- โดย I คือ ความเข้มของคลื่นเหนือเสียง ณ จุดกำเนิดเสียง (วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร)
 A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง (ตารางเซนติเมตร)

ในการปฏิบัติงาน แหล่งจ่ายไฟจะมองค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) ของตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง (Piezoelectric Transducer) มีคุณสมบัติเป็นตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ (Capacitor; $Z = -j/\omega C$) ดังนั้นในการจ่ายไฟให้แกระบบเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าสูงที่สุด จะต้องนำขดลวดเหนี่ยวนำ (Inductor; $Z = j\omega L$) มาต่อเข้าไปในระบบ เพื่อกำจัดเฟสที่แตกต่างกัน (Phase Shift; θ) ของความต่างศักย์และกระแสที่วัดได้ θ นั่นคือ เพื่อให้ได้ค่าเท่ากับศูนย์หรือมีค่าน้อยที่สุด



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5 อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ชุดเครื่องกรองแบบหมุน (Rotating Filter)
2. ตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง (Ultrasonic Transducer)
3. มอเตอร์ (Motor)
4. ปั๊มน้ำ (Centrifugal Pump) ขนาด 0.5 แรงม้า รุ่น Pkm 60-1 ของบริษัท Pedrollo, ประเทศอิตาลี
5. เยื่อแผ่นชนิดเซรามิก (Ceramic Filter) ของบริษัท British Berkefeld, ประเทศอังกฤษ
6. ตัวกำเนิดสัญญาณความถี่ไฟฟ้า (Signal Generator) รุ่น AFG-310 ของบริษัท Tektronix, ประเทศสหรัฐอเมริกา
7. เครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้า (Oscilloscope) รุ่น SS-7802 ของบริษัท IWATSU, ประเทศญี่ปุ่น
8. เครื่องขยายสัญญาณไฟฟ้า (Amplifier) รุ่น P-602 ของบริษัท A-Technic, ประเทศไทย
9. ตัวต้านทาน (Resister) ขนาด 0.38 โอห์ม ขนาด 60 วัตต์
10. หม้อแปลง (Transformer) ขนาด 42:1300 (ขดลวดปฐมภูมิ:ทุติยภูมิ) ขนาด 1 แอมแปร์
11. อัลตราโซนิกโพรบ (Ultrasonic Probe) รุ่น Vibra ของบริษัท Hirayama Manufacturing Corporation, Tokyo, ประเทศญี่ปุ่น
12. ปั๊มแบบท่อรีด (Peristaltic Pump) รุ่น 505 U ของบริษัท WATSON MARLOW Limited, ประเทศอังกฤษ
13. เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (Spectrophotometer) รุ่น spectronec 20 D ของบริษัท Miltorroy company, ประเทศสหรัฐอเมริกา
14. กล้องจุลทรรศน์ (Microscope) รุ่น BH-2 ของบริษัท Olympus

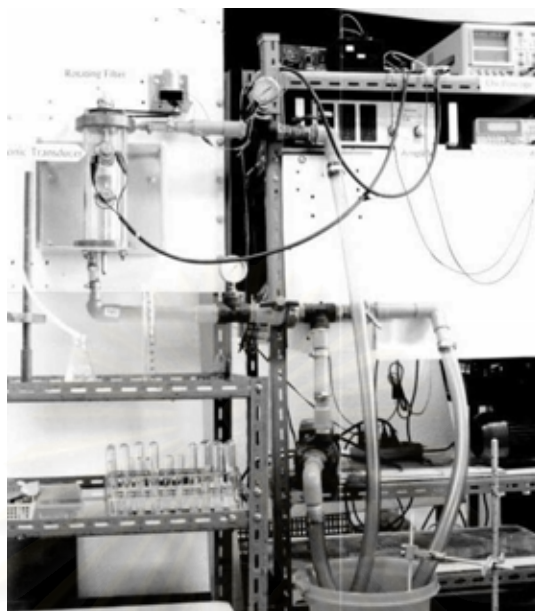
15. เครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle Size Analyzer) รุ่น LS-230 ของบริษัท PCL Holding
16. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รุ่น JSM-5400 ของบริษัท JEOL
17. เครื่องเคลือบทอง รุ่น JFC-1100E ของบริษัท JEOL
18. เครื่องวัดความเป็นกรดต่าง (Digital pH Meter) รุ่น MP220 ของบริษัท METTLER TOLEDO, ประเทศอังกฤษ
19. เครื่องวัดขนาดรูพรุนด้วยปรอท (Pore Sizer) รุ่น 9320 ของบริษัท Micromeritics

5.2 สารเคมี

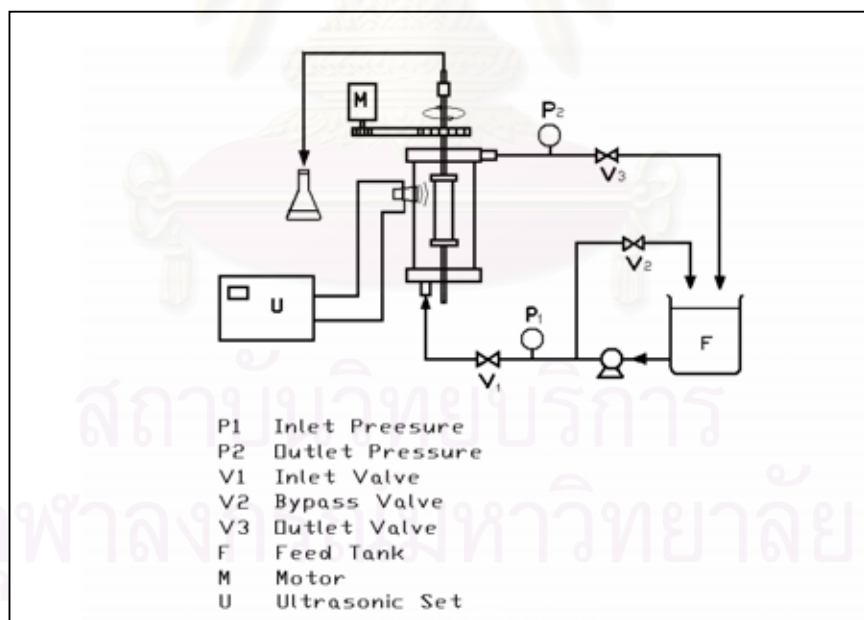
1. ยีสต์แห้ง (Dry Baker's Yeast) ของบริษัท PINNACLE, ประเทศมาเลเซีย
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide)
3. กาวอีพอกซีเรซิน (Epoxy Resin) รุ่น 2 ตัน ของบริษัท ALTECO
4. ลูมินอล (3-Aminophthalhydrazide) ของบริษัท Aldrich Chem. จำกัด
5. บอแรกซ์ (Sodium Tetraborate)
6. เอธิลแอลกอฮอล์ (Ethyl Alcohol)

5.3 ระบบและเครื่องกรองแบบหมุนที่มีการติดตั้งตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ระบบที่ใช้ในงานวิจัยเป็นการกรองระดับจุลภาคแบบไหลขนานที่มีการติดตั้งตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงและการหมุนของเยื่อแผ่นเพื่อช่วยในการเพิ่มอัตราการกรอง แสดงในรูปที่ 5.1 เป็นระบบที่มีการเวียนกลับของสารละลายเพื่อให้ความเข้มข้นในถังป้อนคงที่ ดังแผนผังในรูปที่ 5.2 ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมอุณหภูมิของถังป้อนให้คงที่ ที่สภาวะในการทดลองนี้ทำที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส สารละลายจะถูกปั๊มจากถังป้อนเข้าสู่เครื่องกรองทางด้านล่างโดยใช้ปั๊มหยอชิง (Centrifugal Pump) โดยงานวิจัยนี้จะใช้สารละลายยีสต์ในการทดลอง และในการปรับเปลี่ยนความเร็วของสายป้อนและความดันคร่อมเยื่อแผ่นจะทำการปรับวาล์ว (V_2) พร้อมกับวาล์ว (V_3) เพื่อให้ได้สภาวะในการกรองที่ต้องการ สำหรับสายเพอมีเอทไหลออกทางด้านบนของระบบเพื่อให้ภายในกระบอกเยื่อแผ่นมีน้ำเต็มเนื่องจากต้องการให้คลื่นเหนือเสียงเคลื่อนที่ผ่านภายในกระบอกเยื่อแผ่นได้



รูปที่ 5.1 ภาพถ่ายระบบที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 5.2 แผนผังการทดลอง

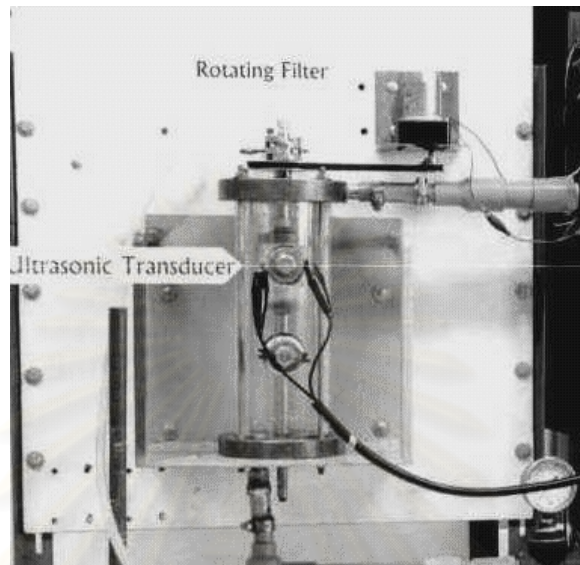
เครื่องกรองแบบหมุนที่มีการติดตั้งตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

จุดประสงค์ในการสร้างเครื่องกรองแบบหมุน (แบบแสดงในภาคผนวก ก) ที่มีการติดตั้งตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง (รูปที่ 5.3) เพื่อเพิ่มอัตราการกรอง เนื่องจากคลื่นเหนือเสียงที่ส่งผ่านจะสามารถกำจัดชั้นเค้กที่สะสมบนผิวของเยื่อแผ่นได้จึงส่งผลให้อัตราการกรองเพิ่มขึ้น โดยจะมีการติดตั้งตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงจำนวน 1 ตัวที่บริเวณผนังด้านนอกของท่อทรงกระบอกและให้มีการหมุนของท่อเยื่อแผ่นด้านในโดยต่อกับมอเตอร์ทางด้านบนของระบบ เพื่อให้เยื่อแผ่นตลอดทั้งท่อสามารถได้รับผลของคลื่นเหนือเสียง โดยลักษณะการหมุนที่ใช้ในการทดลองจะเป็นการหมุนช้าที่ความเร็วรอบประมาณ 5-100 รอบต่อนาที เพื่อไม่ให้มีผลจากอิทธิพลของแรงเฉือนเนื่องจากการหมุนที่เร็วมาก

กระบอกอะคริลิกที่ใช้เป็นเฮาส์ซิง (Housing) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน 9.4 เซนติเมตร หนา 8 มิลลิเมตร สูง 27.5 เซนติเมตร ซึ่งออกแบบให้มีขนาดใหญ่และหนาพอเพื่อที่สามารถติดตั้งตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงภายนอกได้และยังช่วยลดผลของแรงเฉือนที่อาจเกิดขึ้นได้จากความเร็วของการหมุนของเยื่อแผ่นและความเร็วสายป้อน เพื่อให้สามารถศึกษาผลของคลื่นเหนือเสียงได้อย่างชัดเจน โดยมีความจุของเครื่องกรอง 1,900 ลูกบาศก์เซนติเมตร

เยื่อแผ่นที่ใช้เป็นเซรามิคดังรูปที่ 5.4 ขนาดรูปวง (ระบุจากบริษัทที่ผลิต) 0.9 ไมครอน มีเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอก 5.2 เซนติเมตร หนา 0.8 เซนติเมตร สูง 7 เซนติเมตร พื้นที่การกรอง 114 ตารางเซนติเมตร ตัวเยื่อแผ่นเซรามิคจะถูกประกบด้วยหน้าแปลนสแตนเลสสตีล 2 ชั้น ซึ่งติดเข้ากับแกนโดยการหมุนเกลียว โดยให้เยื่อแผ่นเซรามิคนี้อยู่สูงจากทางเข้าและทางออกของเครื่องกรองเป็นระยะ 20 เซนติเมตร เพื่อลดผลกระทบจากการหมุนวนของของเหลวเนื่องจากการเพิ่มและลดพื้นที่หน้าตัดในการไหลจากสายป้อนและออกสู่สายรีเทนเทตอย่างรวดเร็ว

บริเวณผนังด้านนอกของเครื่องกรองซึ่งทำจากท่ออะคริลิกใส มีการติดตั้งตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง 1 ตัว โดยมีระยะห่างระหว่างตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับเยื่อแผ่น 2.2 เซนติเมตร มีพื้นที่ของเยื่อแผ่นที่สัมผัสกับคลื่นเหนือเสียงคิดเป็น $1/10$ ของพื้นที่การกรองทั้งหมด ตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงที่ใช้เป็นชนิดแซนวิช ทรานสดิวเซอร์ (Sandwich Transducer) ทำจากโลหะ 2 ชนิดประกบระหว่างเพียโซเซรามิคทรานสดิวเซอร์ (SONOX-P4) โลหะชั้นหน้าทำจากอลูมิเนียมอัลลอยด์และโลหะชั้นหลังทำจากสแตนเลสสตีลยึดติดกันด้วยน็อตทนแรงดันสูง มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.9 เซนติเมตร คิดเป็นพื้นที่ในการกำจัดคลื่นเหนือเสียงเท่ากับ 11.33 ตารางเซนติเมตร



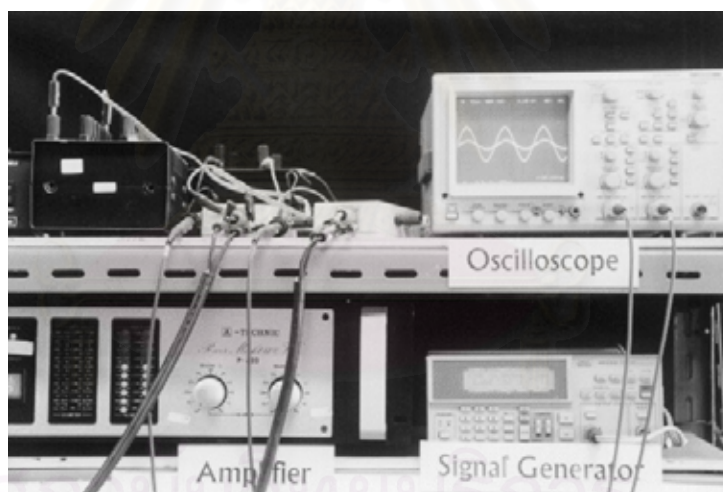
รูปที่ 5.3 เครื่องกรองแบบหมุนพร้อมติดตั้งตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง



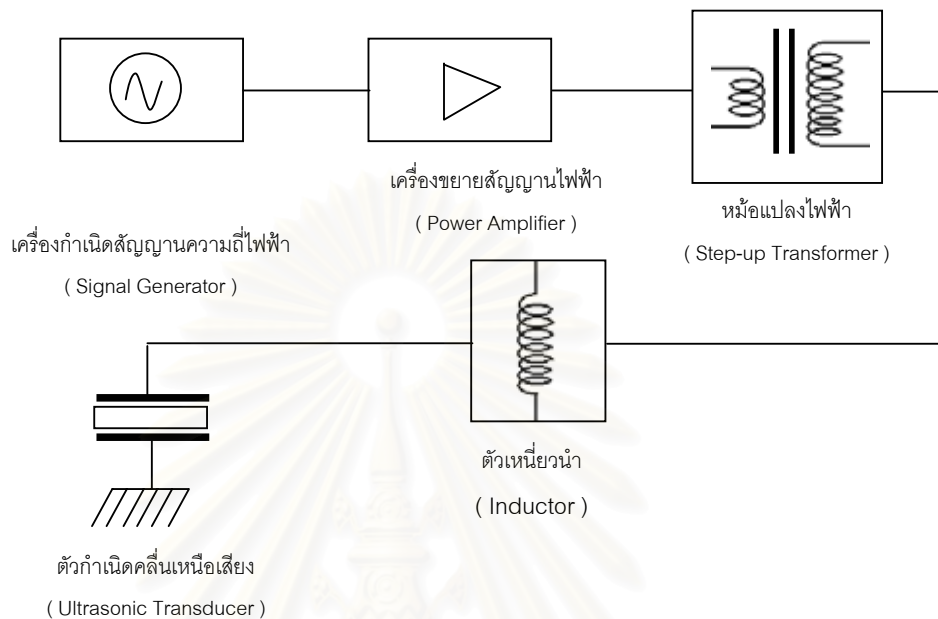
รูปที่ 5.4 เยื่อแผ่นเซรามิค

5.4 ระบบจ่ายไฟฟ้าในการกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง (Piezoelectricceramic Transducer) จะทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าเป็นพลังงานเสียง ซึ่งสัญญาณไฟฟ้าจะกำเนิดจากเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ไฟฟ้า (Signal Generater) และขยายความต่างศักย์ไฟฟ้าโดยเครื่องขยายสัญญาณ (Amplifier) โดยสัญญาณไฟฟ้าที่ได้นี้จะผ่านเข้าตัวต้านทานเพื่อป้องกันวงจรขยายจากการจ่ายกระแสมากเกินไป และขยายความต่างศักย์อีกครั้งโดยหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) เพื่อให้ความต่างศักย์เพิ่มมากขึ้นและได้พลังงานไฟฟ้าสูงต่อเข้ากับตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง โดยจะมีการวัดกำลังไฟฟ้าและค่าความต่างเฟสด้วยเครื่องวัดทางไฟฟ้า (Oscilloscope) บริเวณก่อนจ่ายกระแสไฟฟ้าสู่ตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง ถ้าค่าความต่างเฟสมีมากเกินไปจะทำให้สูญเสียพลังงานมาก สามารถปรับปรุงวงจรโดยการต่อตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) ขนานกับตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงเพื่อลดความต่างเฟส



รูปที่ 5.5 อุปกรณ์ทางไฟฟ้า



รูปที่ 5.6 แผนผังแสดงการจ่ายไฟฟ้าให้กับตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

5.4 วิธีการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกรองร่วมกับการใช้คลื่นเหนือเสียง

5.4.1 ขั้นตอนการทดลอง ในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกรองร่วมกับการใช้คลื่นเหนือเสียง มีขั้นตอนการทดลอง ดังนี้

ขั้นตอนการทดลอง

- 1) ประกอบเครื่องกรองและทำความสะอาดระบบท่อทั้งหมด พร้อมทั้งจัดตั้งระบบการกรองและระบบไฟฟ้าให้ได้สภาวะที่จะทำการทดลอง (สำหรับการวัดความเร็วของสายป้อน จะทำการวัดปริมาตรของน้ำที่ไหลออกมาจากสายรีเทนเตทต่อเวลาจำนวน 5 ครั้ง แล้วนำมาเฉลี่ย โดยในการทดลองจริงจะทำการวัดซ้ำเป็นระยะๆ เพื่อความถูกต้อง)
- 2) ป้อนน้ำกรองจากถังป้อนเข้าสู่ระบบ รอจนกระทั่งความดันที่เกจวัดความดันคงที่ เปิดสายเพอมีเอท วัดฟลักซ์น้ำที่ได้ ปิดสายเพอมีเอท (เพื่อใช้ในการหาค่า R_M) *
- 3) ปิดปั้มน้ำ เอน้ำกรองออกจากระบบ

- 4) เตรียมสารละลายยีสต์ที่จะนำมาใช้ในการทดลอง ปริมาตร 10 ลิตร ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที ป้อนสารละลายยีสต์เข้าสู่ระบบ (เปิดสวิตช์มอเตอร์เพื่อให้เยื่อแผ่นหมุ่นพร้อมทั้งเปิดคลื่นเหนือเสียง กรณีที่มีการหมุ่นหรือใช้คลื่นเหนือเสียง) รอจนกระทั่งความดันที่เกจวัดความดันคงที่ เปิดสายเพอมีเอทวัดปริมาตรที่ได้พร้อมทั้งจับเวลา นำเพอมีเอทที่วัดปริมาตรแล้วเทกลับลงในถังป้อน เพื่อควบคุมความเข้มข้นในถังป้อนให้คงที่ เก็บตัวอย่างเพอมีเอทประมาณ 10 มิลลิลิตร** ทุกๆ 20 นาที
- 5) ในระหว่างการทดลองมีการควบคุมอุณหภูมิในถังป้อนให้คงที่ที่ประมาณ 30 องศาเซลเซียส โดยการใส่ขวดบรรจุน้ำแข็งในถังป้อน ทำการทดลองจนกระทั่งปริมาตรต่อเวลาที่ได้คงที่เป็นระยะเวลา 20 นาที ปิดสายเพอมีเอท พร้อมทั้งหยุดส่งคลื่นเหนือเสียงและปิดสวิตช์มอเตอร์
- 6) ป้อนน้ำกรองเข้าสู่ระบบแทนที่สารละลายยีสต์ โดยการปล่อยสายรีเทนเตทออกนอกระบบไม่ให้เกิดการเวียนกลับ แล้วป้อนน้ำกรองจนกระทั่งน้ำในถังป้อนใส เปิดสายเพอมีเอท วัดฟลักซ์น้ำที่ได้ ปิดสายเพอมีเอท (เพื่อหาค่า $R_M+R_P+R_C$)*
- 7) ปิดปั้มน้ำ ลูบเค้กออกจากเยื่อแผ่นจนหมด ป้อนน้ำกรองเข้าสู่ระบบ รอจนกระทั่งความดันที่เกจวัดความดันคงที่ เปิดสายเพอมีเอท วัดฟลักซ์น้ำที่ได้ (เพื่อหาค่า R_M+R_P)*

หมายเหตุ : * วิธีการคำนวณค่าความต้านทานการกรอง R_M , R_P , R_C ดังแสดงในภาคผนวก ข

** เก็บตัวอย่างเพอมีเอทเพื่อวัดความบริสุทธิ์ของสารที่กรองได้ โดยนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (Spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร แล้วทำการสอบเทียบความเข้มข้นกับกราฟมาตรฐาน (ภาคผนวก ค) ก็จะได้ความเข้มข้นด้านเพอมีเอท เพื่อนำไปหาค่าเปอร์เซ็นต์รีเจคชัน

วิธีเตรียมเยื่อแผ่นที่ใช้ในการทดลอง

กรณีเยื่อแผ่นที่ผ่านการกรองแล้วแต่ยังไม่ผ่านคลื่นเหนือเสียงจะนำมาใช้ซ้ำ โดยจะมีการทำความสะอาดเยื่อแผ่นหลังการใช้งานด้วยการแช่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.5 นอร์มัล เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อกำจัดอนุภาคที่อุดตันในรูพรุนของเยื่อแผ่น แต่ในกรณีของเยื่อแผ่นที่ผ่านการกรองและผ่านคลื่นเหนือเสียงแล้วจะไม่นำมาใช้ในการทดลองอีก เพื่อไม่ให้เกิดความไม่แน่นอนของค่าความต้านทานการกรองของเยื่อแผ่นที่อาจจะไม่เท่าเดิมหรืออาจเกิดการอุดตันในรูพรุนของเยื่อแผ่นที่เพิ่มขึ้น โดยเยื่อแผ่นทุกชิ้นที่จะนำมาใช้งานจะทำการแช่น้ำกรองประมาณ 1

ชั่วโมงก่อนทุกครั้ง เพื่อไล่ฟองอากาศที่อาจอยู่ภายในรูปทรงของเยื่อแผ่น ซึ่งเป็นผลให้ค่าความต้านทานภายในรูปทรงของเยื่อแผ่นเปลี่ยนไป

5.4.2 สภาวะที่ใช้ในการทดลอง การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกรองร่วมกับการใช้คลื่นเหนือเสียง มีสภาวะที่ใช้ในการทดลองดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 สภาวะที่ใช้ในการทดลอง

ความเข้มข้นสายป้อน (กรัมต่อลิตร)	ความดันคร่อมเยื่อแผ่น (บาร์)	ความเร็วรอบในการ หมุน (รอบต่อนาที)	ความเข้มของคลื่น เหนือเสียง (วัตต์ต่อตร.ซม.)
5, 10, 20	0.22	0	0, 1.76
5	0.22	5, 10, 20, 50, 100	0, 0.44, 1.76, 3.09
10	0.22	5, 10, 20, 50, 100	0, 0.44, 1.76, 3.09
10	0.22, 0.35, 0.46	5, 20, 50	0, 0.44, 1.76, 3.09

หมายเหตุ: - ความเร็วสายป้อนที่ใช้ในการทดลอง 0.06 เมตรต่อวินาที
- ความเข้มของคลื่นเหนือเสียง (0.44, 1.76 และ 3.09 วัตต์ต่อตร.ซม.) คำนวณจากกำลังของคลื่นเหนือเสียงที่ 5, 20 และ 35 วัตต์ ตามลำดับ

5.4.3 การศึกษาปรากฏการณ์คาวิเทชัน

เนื่องจากได้มีการศึกษาแล้วว่าปรากฏการณ์คาวิเทชันที่เกิดขึ้นในตัวกลางของเหลวที่คลื่นเหนือเสียงเคลื่อนที่ผ่านเป็นตัวสำคัญในการลดการสะสมของอนุภาคบนผิวเยื่อแผ่นซึ่งเป็นผลให้อัตราการกรองเพิ่มขึ้น โดยการทดลองแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ

ก. การเจาะทะลุบนออลูมิเนียมฟอยล์ เพื่อทำการศึกษการเกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันซึ่งทำให้เกิดการเจาะทะลุ (Pitting Force) บนผิวเยื่อแผ่นโดยคลื่นเหนือเสียง ในการทดลองจะนำออลูมิเนียมฟอยล์ติดทับบนเยื่อแผ่นแล้วนำไปประกอบในเครื่องกรองพร้อมทั้งใส่น้ำจนเต็มกระบอกอะคริลิก [ทำการทดลองทั้งกรณีที่มีการไหลของน้ำและไม่มีกรไหลของน้ำ] แล้วเปิดตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงเป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นนำออลูมิเนียมฟอยล์ออกมาเพื่อทำการ

ถ่ายภาพและศึกษาปริมาณและบริเวณของรูที่เกิดขึ้น โดยทำการทดลองที่สภาวะความเข้มข้นของคลื่นเหนือเสียงและความเร็วรอบในการหมุนของเยื่อแผ่น ดังนี้

ตารางที่ 5.2 สภาวะที่ใช้ในการทดสอบคาวิตेशनบนอลูมิเนียมฟอยล์

ความเข้มของคลื่นเหนือเสียง (วัตต์ต่อตร.ซม.)	ความเร็วรอบในการหมุน (รอบต่อนาที)
0.44, 1.76, 3.09	0
3.09	5,20,100

- ข. การเรืองแสงด้วยสารเคมี (Chemiluminescence) เพื่อศึกษาปรากฏการณ์คาวิตेशनแบบไม่คงตัว (Transient Cavitation) ที่เกิดขึ้นในตัวของเหลว โดยการใช้สารละลายลูมินอล (3-Aminophthalhydrazide) ที่ความเข้มข้น 2.5×10^{-3} โมลาร์ ที่ pH เท่ากับ 10.7 เป็นตัวกลางในการส่งคลื่นเหนือเสียงจากตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงที่ติดบนผนังอะคริลิกด้านนอกไปยังเยื่อแผ่น โดยไม่มีการไหลของสารละลายลูมินอล ในการทดลองจะต้องเป็นระบบที่มีดสนิทเพื่อให้สามารถเห็นการเรืองแสงสีฟ้าที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์การเกิดคาวิตेशन หลังจากนั้นทำการถ่ายภาพด้วยฟิล์มความไวแสงสูง ASA1600 และเปิดหน้ากล้องเป็นเวลา 30 นาที เพื่อบันทึกภาพบริเวณและความเข้มของการเรืองแสงที่เกิดขึ้นในเครื่องกรองที่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง โดยทำการทดลองที่สภาวะของความเข้มคลื่นเหนือเสียงและความเร็วในการหมุนของเยื่อแผ่น ดังนี้

ตารางที่ 5.3 สภาวะที่ใช้ในการทดสอบคาวิตेशनด้วยการเรืองแสงด้วยสารเคมี

ความเข้มของคลื่นเหนือเสียง (วัตต์ต่อตร.ซม.)	ความเร็วรอบในการหมุน (รอบต่อนาที)
0.44, 1.76, 3.09	0
3.09	5, 100

- ค. การกำจัดอนุภาคดินเหนียว เพื่อศึกษาการหลุดของอนุภาคดินเหนียวด้วยการยุบตัวของคาวีเทชันโดยนำดินเหนียวมาฉาบบนผิวของเยื่อแผ่น แล้วนำไปประกอบในเครื่องกรองพร้อมทั้งใส่น้ำจนเต็มกระบอกอะคริลิต [ทำการทดลองทั้งกรณีที่มีการไหลของน้ำและไม่มีกรไหลของน้ำ] แล้วส่งคลื่นเหนือเสียงเป็นระยะเวลา 30 วินาที ขณะเดียวกันทำการบันทึกภาพที่เวลาต่างๆ โดยทำการทดลองที่สภาวะของความเข้มข้นเหนือเสียงและความเร็วในการหมุนของเยื่อแผ่น ดังนี้

ตารางที่ 5.4 สภาวะที่ใช้ในการทดสอบการกำจัดอนุภาคดินเหนียว

ความเข้มของคลื่นเหนือเสียง (วัตต์ต่อตร.ซม.)	ความเร็วรอบในการหมุน (รอบต่อนาที)
0.44, 1.76, 3.09	0, 5, 20, 100

5.5 วิธีการศึกษาผลของคลื่นเหนือเสียงต่อเยื่อแผ่น

คลื่นเหนือเสียงที่มีพลังงานสูงเมื่อผ่านของเหลวจะเกิดปรากฏการณ์คาวีเทชัน ซึ่งอาจเป็นผลให้เกิดการเจาะทะลุบนของแข็งที่อยู่บริเวณนั้น เป็นผลให้ผิวของของแข็งถูกทำลายหรือเป็นรอยได้ จึงจำเป็นที่จะต้องศึกษาผลของคลื่นเหนือเสียงที่มีเยื่อแผ่น โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วน คือ

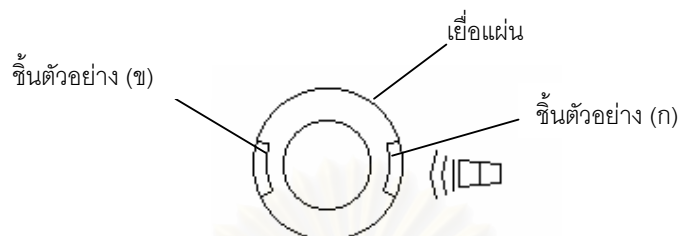
- ก. การวัดขนาดรูพรุนและความพรุนด้วยเครื่องวัดความพรุนด้วยปรอท (Pore Sizer) โดยตัดตัวอย่างผิวหน้าของเยื่อแผ่นชั้นนอกที่ผ่านการกรองที่สภาวะต่างๆ ดังนี้

ตารางที่ 5.5 สภาวะในการกรองสำหรับศึกษาผลของคลื่นเหนือเสียงต่อเยื่อแผ่นโดยการวิเคราะห์ขนาดรูพรุนด้วยปรอท

ความเข้มของคลื่นเหนือเสียง (วัตต์ต่อตร.ซม.)	ความเร็วรอบในการหมุน (รอบต่อนาที)
0	0
0.44	0
1.76	0
3.09	0, 0*, 20

หมายเหตุ : ใช้ชิ้นตัวอย่าง (ก) และ (ข) ดังรูปต่อไปนี้

* ชิ้นตัวอย่าง (ข)

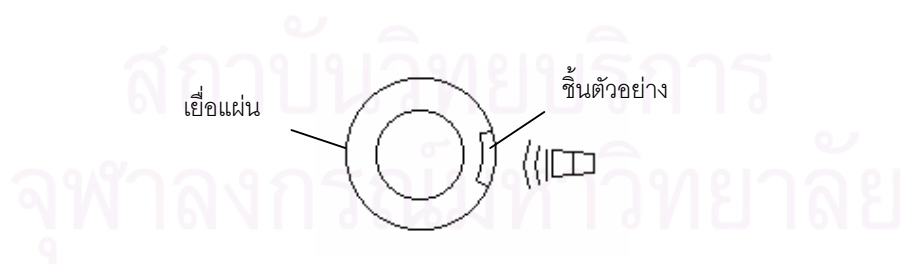


ข. การถ่ายภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยนำตัวอย่างผิวหน้าของเยื่อแผ่นที่ผ่านการกรองที่สภาวะต่างๆ ดังนี้

ตารางที่ 5.6 สภาวะในการกรองสำหรับการศึกษาผลของคลื่นเหนือเสียงต่อเยื่อแผ่นโดยการถ่ายภาพ SEM

ความเข้มของคลื่นเหนือเสียง (วัตต์ต่อตร.ซม.)	ความเร็วรอบในการหมุน (รอบต่อนาที)
0	0
0.44	0, 5
1.76	0, 20
3.09	0, 20

หมายเหตุ: ชิ้นตัวอย่างที่นำมาทดสอบแสดงดังรูปต่อไปนี้



5.6 วิธีการศึกษาผลของคลื่นเหนือเสียงต่อยีสต์

คลื่นเหนือเสียงที่มีพลังงานสูงเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางของเหลวที่มีอนุภาคของแข็งอยู่ การยุบตัวของคาวิเทชันอาจมีผลต่ออนุภาคเหล่านั้นโดยเฉพาะอนุภาคยีสต์ซึ่งเป็นเซลล์สิ่งมีชีวิต ดังนั้นจึงต้องศึกษาผลที่มีต่อยีสต์ด้วย โดยเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างยีสต์ที่ผ่านการกรองโดยไม่มี การใช้คลื่นเหนือเสียง, การกรองที่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง และ ผ่านคลื่นเหนือเสียงจากอัลตราโซนิคโพรบ โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วน คือ

ก. การศึกษาการกระจายขนาดของอนุภาคยีสต์ด้วยเครื่องวัดการกระจายขนาดของอนุภาค

(Particle Size Analyzer) โดยใช้ตัวอย่างสารละลายยีสต์ที่ผ่านการกรองที่สภาวะการทดลอง ดังนี้

1. สารละลายยีสต์ที่ผ่านการกรองปกติโดยไม่ใช้คลื่นเหนือเสียง โดยตั้งตัวอย่างเมื่อเวลาผ่านไป 0, 30, 60, 90 และ 120 นาที ตามลำดับ
2. สารละลายยีสต์ที่ผ่านการกรองร่วมกับการใช้คลื่นเหนือเสียงที่ 3.09 วัตต์ต่อตร.ซม. โดยตั้งตัวอย่างเมื่อเวลาผ่านไป 0, 30, 60, 90 และ 120 นาที ตามลำดับ
3. สารละลายยีสต์ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ที่ผ่านคลื่นเหนือเสียงจากอัลตราโซนิคโพรบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 เซนติเมตร ที่ความเข้มของคลื่นเหนือเสียงประมาณ 30 วัตต์ต่อ ตร.ซม. โดยไม่มีการควบคุมอุณหภูมิ เป็นเวลา 5 และ 15 นาที ตามลำดับ
4. สารละลายยีสต์ที่ผ่านการปั่นกวนด้วยเครื่องวอร์เทกซ์ โดยตั้งตัวอย่างเมื่อเวลาผ่านไป 3, 6, 10 และ 20 นาที ตามลำดับ

ข. การศึกษาลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Microscope) โดยการถ่ายภาพลักษณะของยีสต์จากกล้องจุลทรรศน์ โดยใช้ตัวอย่างสารละลายยีสต์ที่ผ่านการกรองที่สภาวะการทดลอง ดังนี้

1. สารละลายยีสต์ที่ผ่านการกรองร่วมกับการใช้คลื่นเหนือเสียงที่ 3.09 วัตต์ต่อตร.ซม. โดยตั้งตัวอย่างเมื่อเวลาผ่านไป 0, 30, 60 และ 90 นาที ตามลำดับ
2. สารละลายยีสต์ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ที่ผ่านคลื่นเหนือเสียงจากอัลตราโซนิคโพรบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 เซนติเมตร ที่ความเข้มของคลื่นเหนือเสียงประมาณ 30 วัตต์ต่อ ตร.ซม. โดยไม่มีการควบคุมอุณหภูมิ เป็นเวลา 5 และ 15 นาที ตามลำดับ

บทที่ 6

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงกลไกของปรากฏการณ์ของคavitเทชันต่อการกำจัดอนุภาคบนผิวเยื่อแผ่น สมมติฐานต่างๆที่ใช้ในการทดลอง ลักษณะของการกำจัดอนุภาคบนผิวเยื่อแผ่น ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลของปัจจัยต่างๆที่มีต่อการกรองระดับจุลภาคร่วมกับการใช้คลื่นเหนือเสียงโดยมีเยื่อแผ่นหมุน ผลที่มีต่อเยื่อแผ่นและยีสต์อันเนื่องมาจากคลื่นเหนือเสียง ตลอดจนวิเคราะห์ความคุ้มทุนในการนำวิธีนี้ไปประยุกต์ใช้งานจริง

จากที่กล่าวมาแล้วในบทนำเกี่ยวกับการศึกษาที่ผ่านมาของเทคนิคการใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมกับการกรองระดับจุลภาคในเครื่องกรองแบบแผ่น [11] และแบบท่อ [1] พบว่าการใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมกับการกรองระดับจุลภาคสามารถเพิ่มอัตราการกรองได้เมื่อเปรียบเทียบกับเมื่อไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง เนื่องจากการเกิดปรากฏการณ์คavitเทชันและไมโครสตรีมมิ่ง (Microstreaming) เป็นผลให้อัตราการสะสมอนุภาคบนผิวเยื่อแผ่นลดลง ณ บริเวณที่คลื่นเหนือเสียงตกกระทบเยื่อแผ่น

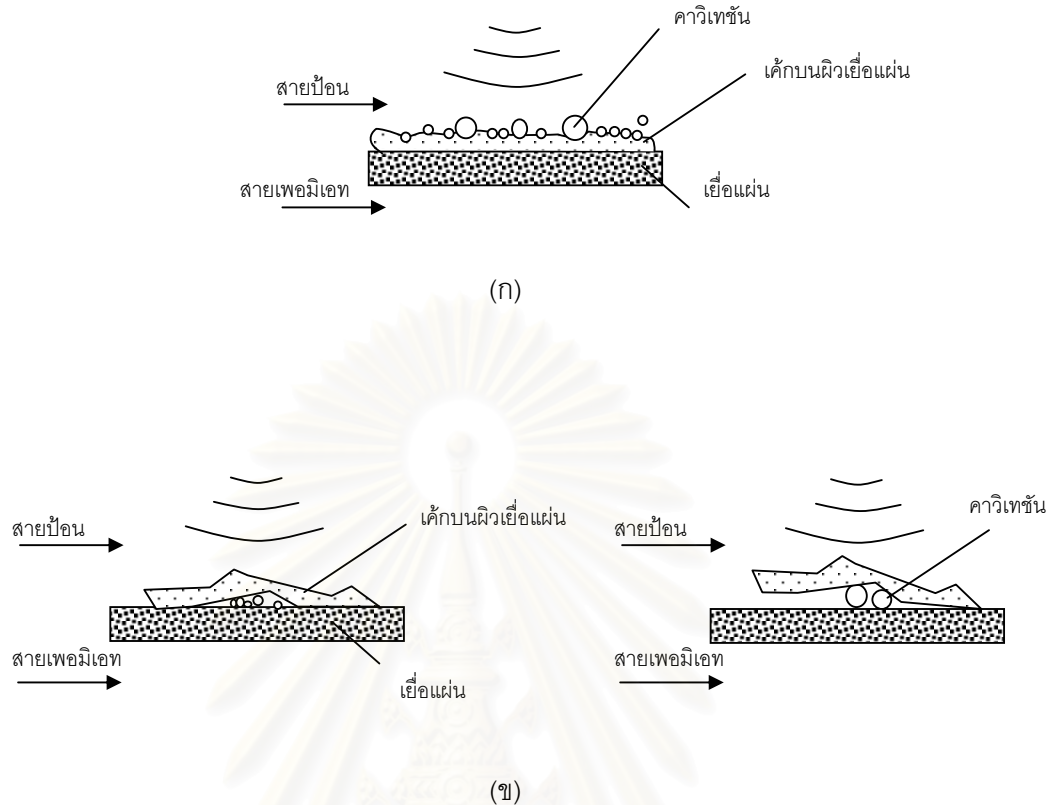
และเพื่อให้เข้าใจถึงกลไกของปรากฏการณ์คavitเทชันที่จะกล่าวถึง ซึ่งเป็นกลไกหลักในการลดการสะสมของอนุภาค โดยตั้งสมมติฐานว่า

1. คavitเทชันแบบคงตัว (Stable Cavitation) จะสามารถกำจัดอนุภาคที่สะสมอยู่บนผิวเยื่อแผ่นได้เนื่องจากคavitเทชันที่เกิดขึ้นจำนวนมากนี้จะมีการเคลื่อนที่ไปมา รวมทั้งมีการลดและขยายขนาดตลอดเวลา เกิดเป็นสายของฟองขนาดเล็กที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า เรียกว่า ไมโครสตรีมมิ่ง (Microstreaming) นอกจากนั้นการเคลื่อนที่ของคavitเทชันจะทำให้เกิดการปั่นป่วนภายในของเหลวบริเวณด้านหลังเมื่อคavitเทชันเคลื่อนที่ผ่านบริเวณผิวหน้าของเยื่อแผ่นที่มีอนุภาคสะสมอยู่ จึงทำให้เกิดแรงเฉือน (Shear Force) ขึ้นที่ผิวหน้าของเยื่อแผ่น อนุภาคบางส่วนจะหลุดออกมาปนกับสายป้อน ทำให้ความหนาของชั้นอนุภาคที่สะสมบริเวณผิวหน้าของเยื่อแผ่นลดลง ส่งผลให้ค่าความต้านทานการกรองเนื่องจากการสะสมของอนุภาคบริเวณผิวหน้าของเยื่อแผ่นต่ำลงเป็นผลให้อัตราการกรองมีค่าสูงขึ้น
2. คavitเทชันแบบไม่คงตัว (Transient Cavitation) การยุบตัวของคavitเทชันประเภทนี้ช่วยทำให้อนุภาคที่สะสมอยู่ลดน้อยลงได้ โดยแบ่งได้ออกเป็น 3 ลักษณะ คือ

- 2.1 ทำให้เกิดความดันและอุณหภูมิที่สูงบริเวณที่คาวิตีเหล่านี้เกิดการยุบตัว เมื่อมีการเคลื่อนที่ของของเสียดในตัวกลางของเหลว จะเกิดบริเวณอัด (Compression) และ บริเวณขยาย (Rarefaction) ของโมเลกุล โดยการเกิดคาวิตีเหล่านี้จะเกิดในช่วงขยาย เนื่องจากมีความดันในของเหลวต่ำกว่าความดันไอ (Vapor Pressure) ของของเหลวและจะเกิดการยุบตัวและมีขนาดเล็กลงในบริเวณอัดเพราะมีความดันภายนอกสูงกว่าความดันภายในคาวิตีส่งผลให้บริเวณที่มีการยุบตัวเกิดความร้อนขึ้น ซึ่งมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าสูงขึ้น ดังนั้นอัตราการกรองเพิ่มมากขึ้นได้
- 2.2 ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความดันอย่างรวดเร็ว (Shock Wave) โดยเกิดขึ้นจากการยุบตัวของคาวิตีที่เกิดขึ้นบริเวณของของแข็ง จะส่งผลให้ผิวของของแข็งถูกทำลายหรือเกิดเป็นรอยแตก จุดเริ่มต้นของฟอง (Nuclei) ที่เกิดขึ้นในกรณีนี้ส่วนใหญ่ คือ ฟองอากาศหรือฟองก๊าซที่ติดอยู่บริเวณผิวของของแข็งในส่วนของขรุขระหรือที่มีวัสดุแปลกปลอมติดอยู่
- 2.3 ทำให้เกิดแรงเจาะทะลุ (Pitting Force) เนื่องจากการยุบตัวของคาวิตีที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้ผิวของของแข็ง การยุบตัวของคาวิตีประเภทนี้มีลักษณะแตกต่างจากการยุบตัวในหัวข้อ 2.2 คือ ทำให้เกิดการยุบตัวที่ไม่สมมาตร จึงก่อให้เกิดแรงเจาะทะลุ (Microjet) พุ่งเข้าสู่ผิวของแข็งบริเวณนี้มีวัสดุแปลกปลอมติดอยู่ก็จะหลุดออกไปได้ เป็นคุณสมบัติการทำความสะอาดของคลื่นเหนือเสียงที่ถูกนำไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย เมื่อพิจารณากระบวนการกรองซึ่งมีอนุภาคสะสมกันอยู่บริเวณผิวเยื่อแผ่น การยุบตัวของคาวิตีในลักษณะนี้จะทำให้อนุภาคที่สะสมถูกแรงเจาะทะลุกระทำจนเกิดเป็นรูบนผิวหน้าของเค้ก

โดยตั้งสมมติฐานว่าคาวิตีที่เกิดขึ้นซึ่งเป็นสาเหตุในการลดการสะสมของอนุภาคบนผิวเยื่อแผ่นซึ่งเป็นผลให้ฟลักซ์การกรองเพิ่มขึ้นนั้น สามารถเกิดขึ้นได้จาก 2 ตำแหน่งหลักต่อไปนี้ คือ

1. คาวิตีที่เกิดบนผิวของชั้นเค้ก การเกิดคาวิตีในบริเวณนี้จะเกิดจากจุดกำเนิดฟองเริ่มต้น คือ ฟองก๊าซที่อยู่ภายในของเหลวและที่ติดอยู่บนผิวของชั้นอนุภาคที่สะสมอยู่บนผิวของเยื่อแผ่น ดังรูป 6.1 (ก) เป็นผลให้ผิวหน้าของชั้นเค้กค่อยๆ หลุดออกไปทีละน้อย
2. คาวิตีที่เกิดระหว่างชั้นเค้กและบนผิวชั้นนอกของเยื่อแผ่น ซึ่งเกิดจากจุดกำเนิดฟองที่อยู่ระหว่างผิวของเยื่อแผ่นกับชั้นเค้ก ดังรูป 6.1 (ข) ส่งผลให้ชั้นเค้กสามารถหลุดได้เป็นแผ่น ถ้าความแรงมีมากพอหรือเกิดซ้ำๆ เป็นระยะเวลา



รูปที่ 6.1 แสดงการหลุดออกของอนุภาคที่สะสมบนผิวของเยื่อแผ่นเนื่องจากการยุบตัวของ

คาวีเทชั่น

(ก) คาวีเทชั่นที่อยู่ระหว่างชั้นค้ำและผิวชั้นนอกของเยื่อแผ่น

(ข) คาวีเทชั่นที่เกิดบนผิวของชั้นค้ำ

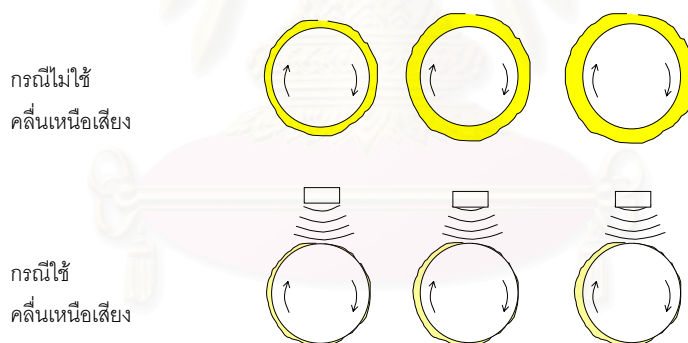
เมื่อพิจารณาการรบกวนร่วมกับการใช้คลื่นเหนือเสียงและมีการหมุนเยื่อแผ่น

เนื่องจากการทดลองที่ผ่านมาของเทคนิคการใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมกับการกรองระดับจุลภาคในเครื่องกรองแบบแผ่น [11] และแบบท่อ [1] พบว่าการใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมกับการกรองระดับจุลภาคสามารถเพิ่มอัตราการกรองได้เมื่อเปรียบเทียบกับเมื่อไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง ผลการทดลองพบว่าคลื่นเหนือเสียงจะมีผลในการลดการสะสมของอนุภาคหรือค้ำบนผิวเยื่อแผ่น เฉพาะในบริเวณที่คลื่นเหนือเสียงตกกระทบเท่านั้น ดังนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้คลื่นเหนือเสียง คือ จะต้องทำการติดตั้งตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงให้ครอบคลุมเยื่อแผ่นที่ใช้ในการกรอง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำประโยชน์ของการใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมกับการกรองมาประยุกต์ใช้กับการกรองแบบท่อหมุนเพื่อเพิ่มพื้นที่ของเยื่อแผ่นที่คลื่นเหนือเสียงสามารถตกกระทบได้ โดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มจำนวนตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง และในงานวิจัยนี้ซึ่งเป็นการกรองแบบเยื่อแผ่นหมุน

สภาวะในการหมุนซึ่งเป็นปัจจัยที่เพิ่มเข้ามานั้นก็เป็นปัจจัยสำคัญต่อกลไกในการลดการสะสมของอนุภาคบนผิวเยื่อแผ่นนอกจากปัจจัยของควาวิทซ์ดังได้กล่าวมาแล้ว เนื่องจากเมื่อมีการหมุนของเยื่อแผ่นทำให้แต่ละจุดบนผิวเยื่อแผ่นจะมีเวลาในการสัมผัสกับคลื่นเหนือเสียงได้น้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับจุดที่สัมผัสกับคลื่นเหนือเสียงตลอดเวลาของกรณีไม่มีการหมุนเยื่อแผ่นในช่วงเวลาเท่ากัน แต่การหมุนของเยื่อแผ่นทำให้ทุกจุดบนผิวเยื่อแผ่นสามารถสัมผัสคลื่นเหนือเสียงได้ ดังนั้นปรากฏการณ์ในการกำจัดเค้ของกรรอนที่มีการหมุนเยื่อแผ่นร่วมกับการใช้คลื่นเหนือเสียงจึงต่างจากเมื่อไม่มีการหมุนเยื่อแผ่น

ในสภาวะการกรรอนจริงอาจเกิดควาวิทซ์ ณ ตำแหน่งต่างๆดังได้กล่าวมาแล้วเป็นปริมาณมากน้อยต่างกัน ซึ่งจะทำให้เกิดผลในการกำจัดเค้ที่ต่างกันด้วยขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นเค้, ความเข้มของคลื่นเหนือเสียง และ สภาวะในการกรรอน เป็นผลให้การลดการสะสมของอนุภาคบนผิวเยื่อแผ่นเมื่อมีการใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมกับการหมุนเยื่อแผ่นแบ่งเป็น 2 ลักษณะ ดังนี้

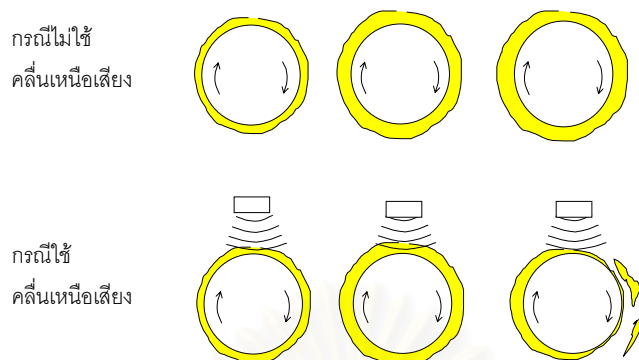
1. ทำให้ชั้นเค้บางลงตลอดทั้งเยื่อแผ่น ดังรูป 6.2 (ก)
2. ทำให้ชั้นเค้หลุดออกเป็นแผ่น ดังรูป 6.2 (ข)



(ก)

รูปที่ 6.2 แสดงลักษณะการลดการสะสมของอนุภาคบนผิวของเยื่อแผ่นโดยคลื่นเหนือเสียงเมื่อมีการหมุนเยื่อแผ่น

- (ก) ในกรณีชั้นเค้บางลงตลอดทั้งเยื่อแผ่น
- (ข) ในกรณีชั้นเค้หลุดออกเป็นแผ่น

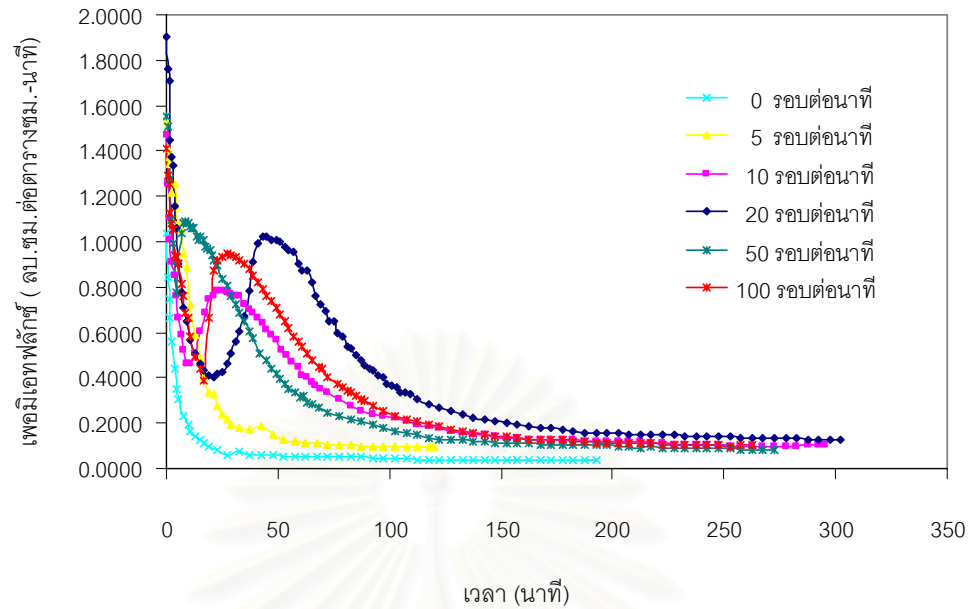


(ข)

- รูปที่ 6.2(ต่อ) แสดงลักษณะการลดการสะสมของอนุภาคบนผิวของเยื่อแผ่นโดยคลื่นเหนือเสียง เมื่อมีการหมุนเยื่อแผ่น
- (ก) ในกรณีชั้นเค็กบางลงตลอดทั้งเยื่อแผ่น
- (ข) ในกรณีชั้นเค็กหลุดออกเป็นแผ่น

การทดลองที่มีลักษณะการลดการสะสมของอนุภาคบนผิวของเยื่อแผ่นกรณีที่ทำให้ชั้นเค็กหลุดทั้งแผ่นแสดงดังรูปที่ 6.3 และการหลุดแบบนี้ นอกจากจะทำให้ฟลักซ์การกรองเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแล้ว ยังส่งผลต่อค่าความต้านทานการกรองของการอุดตันในรูปพูนอีกด้วย ดังตารางที่ 6.1 พบว่าการหลุดของเค็กแบบทั้งแผ่นในขณะกรองเมื่อมีการใช้คลื่นเหนือเสียงและหมุนเยื่อแผ่นจะทำให้ความต้านทานของการอุดตันในรูปพูนเพิ่มขึ้นถึง 40 เท่า ทั้งนี้เนื่องจาก

1. การหลุดของเค็กจะทำให้ไม่มีชั้นเค็กซึ่งเป็นตัวกรองอีกชั้นหนึ่ง ทำให้อนุภาคสามารถเข้าไปอุดตันในรูปพูนได้ง่ายขึ้น
2. เมื่อเค็กหลุดแล้วเป็นผลให้คลื่นเหนือเสียงสัมผัสกับเยื่อแผ่นโดยตรงจึงทำให้เยื่อแผ่นสามารถถูกทำลายโดยคลื่นเหนือเสียงได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้เยื่อสามารถเข้าไปอุดตันในรูปพูนได้
3. อนุภาคยีสต์ได้ถูกทำให้แยกเป็นอนุภาคเดี่ยวๆมากขึ้น เนื่องจากได้ทำการวัดการกระจายขนาดของอนุภาคยีสต์แล้ว (ในหัวข้อ 6.3) พบว่าเมื่อทำการทดลองไประยะหนึ่งทำให้อนุภาคยีสต์ซึ่งเคยรวมกันเป็นกลุ่มก้อนแยกออกเป็นอนุภาคเดี่ยวๆ ซึ่งมีขนาดประมาณ 2-6 ไมครอน ฉะนั้นสามารถเข้าไปอุดตันในรูปพูนของเยื่อแผ่นซึ่งมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 2-3 ไมโครเมตรได้



รูปที่ 6.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอมีเอทพลักซ์และเวลา ในกรณีที่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 0, 10, 20, 50 และ 100 รอบต่อนาที ตามลำดับ (ความเร็วสายป้อน 0.06 เมตรต่อวินาที, ความเข้มข้นของสารละลายยีสต์ 5 กรัมต่อลิตร, ความดันคร่อมเยื่อแผ่น 0.22 บาร์, ความเข้มของคลื่นเหนือเสียง 1.76 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร)

ตารางที่ 6.1 แสดงค่าความต้านทานการกรองกรณีที่มีและไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียงที่ความเร็วรอบต่างกัน

ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	กรณีที่ไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง				กรณีที่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง			
	R_M	R_C	R_P	R_T ($R_M+R_C+R_P$)	R_M	R_C	R_P	R_T ($R_M+R_C+R_P$)
5	11.84	646.03	-0.96	656.91	10.49	162.20	1.40	174.08
10	10.68	671.07	0.93	682.67	10.85	68.36	36.85	116.05
20	9.84	660.93	-1.22	669.54	8.45	55.83	40.59	104.87
50	11.53	633.14	0.08	644.75	10.18	145.69	44.22	200.09
100	12.09	609.20	0.43	621.72	12.01	101.16	48.02	161.19

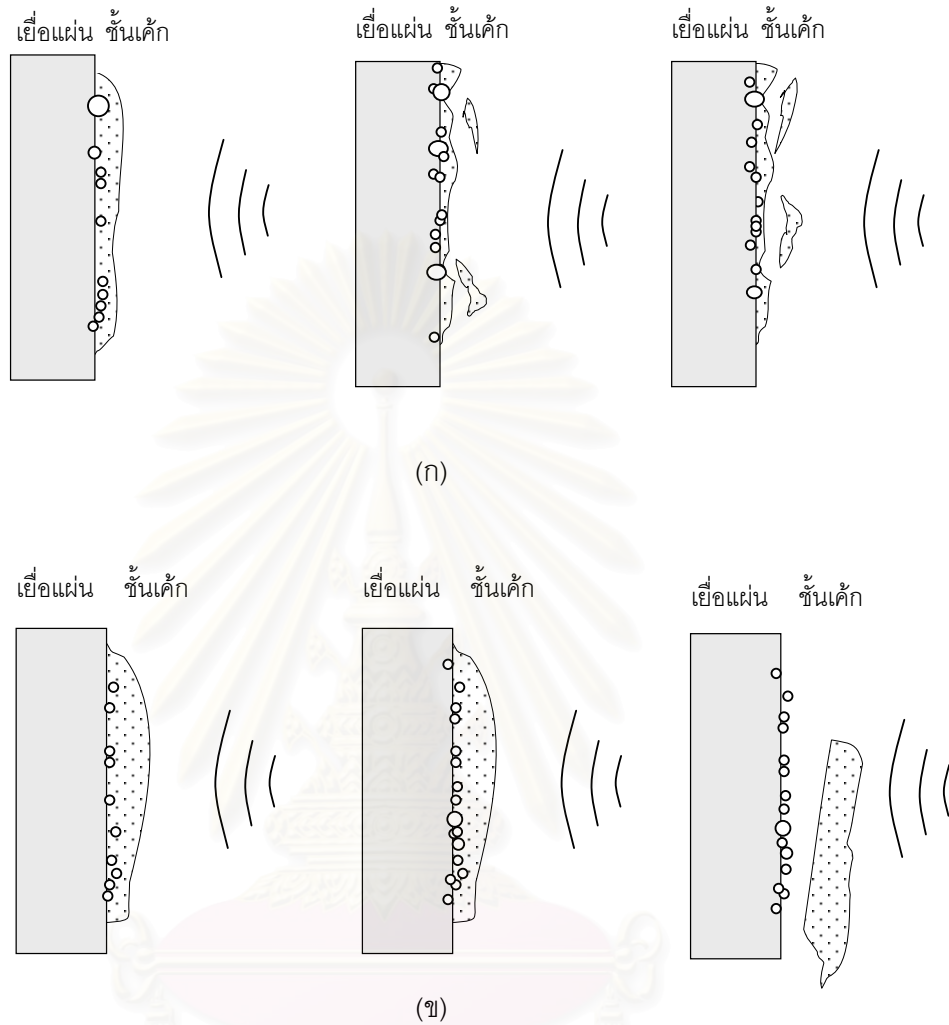
หน่วย: $\times 10^8$ (1/เซนติเมตร)

(สภาวะของการทดลอง: ความเร็วสายป้อน 0.06 เมตรต่อวินาที, ความดันคร่อมเยื่อแผ่น 0.22 บาร์, ความเข้มข้น 5 กรัมต่อลิตร, ความเข้มของคลื่นเหนือเสียง 1.76 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร)

เมื่อพิจารณาการใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมกับการกรองเมื่อชั้นเค้กมีความหนาต่างกัน

ดังได้กล่าวมาแล้วว่าลักษณะการลดการสะสมของอนุภาคบนผิวของเยื่อแผ่นขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นเค้กด้วย จึงทำการทดลองเพื่ออธิบายปัจจัยนี้ โดยการหาดินเหนียวบนผิวของเยื่อแผ่นให้มีความหนาต่างกันแล้วนำไปประกอบบนเครื่องกรองปกติ และส่งคลื่นเหนือเสียงผ่านน้ำซึ่งไหลด้วยสภาวะเดียวกับการทดลองในการกรอง ผลการทดลองสามารถอธิบายได้โดยคุณลักษณะของคลื่นเหนือเสียงและปรากฏการณ์ควิเทชันที่เกิดขึ้น ดังนี้

ในกรณีที่ชั้นเค้กมีความหนาไม่เท่ากัน ดังรูปที่ 6.4 พบว่าเมื่อพิจารณากรณีที่ตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงสามารถส่งผ่านคลื่นเหนือเสียงมาตกกระทบบนชั้นเค้กด้วยความเข้มเท่ากันและเป็นการส่งผ่านคลื่นเหนือเสียงในทิศทางเดียวกับการกรอง คลื่นเหนือเสียงจะผ่านชั้นเค้กก่อนไปถึงเยื่อแผ่น ในกรณีแรกที่ชั้นเค้กมีความหนาน้อย (รูปที่ 6.4 (ก)) พลังงานของคลื่นเหนือเสียงที่ถูกดูดซับไปกับชั้นเค้กก็จะน้อย จึงส่งผลให้พลังงานที่ส่งผ่านไปยังบริเวณระหว่างชั้นเค้กกับเยื่อแผ่นมีมาก ควิเทชันที่เกิดบริเวณระหว่างชั้นเค้กกับเยื่อแผ่นจึงมีความรุนแรงมากด้วย ส่งผลให้ชั้นเค้กหลุดได้เร็ว และบริเวณที่เกิดควิเทชันขึ้นบนผิวของเยื่อแผ่นก็จะเป็นบริเวณที่อนุภาคที่สะสมสามารถหลุดได้ทันที สำหรับกรณีเมื่อชั้นเค้กมีความหนามากกว่า (รูปที่ 6.4 (ข)) คลื่นเหนือเสียงจะถูกดูดซับและสูญเสียพลังงานไปบางส่วนกับชั้นเค้กมากขึ้น แต่หากยังคงมีพลังงานที่มีความเข้มมากพอที่จะทำให้เกิดควิเทชันระหว่างชั้นเค้กกับเยื่อแผ่นรวมทั้งมวลของชั้นเค้กที่มีมากก็จะส่งผลให้ชั้นเค้กหลุดแบบทั้งแผ่นได้ ดังที่สังเกตเห็นได้จากการทดลอง



รูปที่ 6.4 แสดงการส่งผ่านคลื่นเหนือเสียงไปยังชั้นเค็กที่มีความหนาไม่เท่ากัน เมื่อคลื่นเหนือเสียง

ตกกระทบ

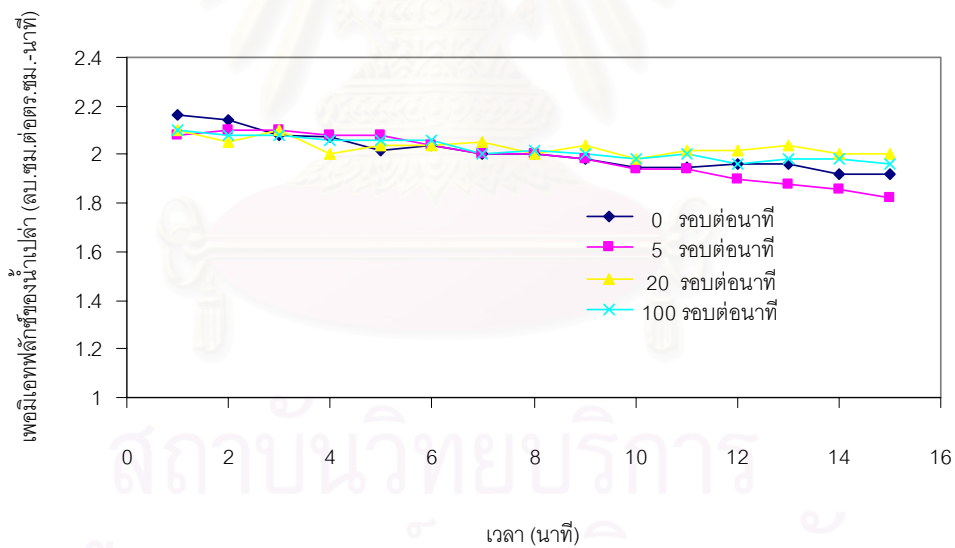
(ก) กรณีชั้นเค็กบาง

(ข) กรณีชั้นเค็กหนา

6.1 ผลของปัจจัยต่างๆที่มีต่อฟลักซ์การกรอง

6.1.1 ความเร็วรอบในการหมุนของเยื่อแผ่น

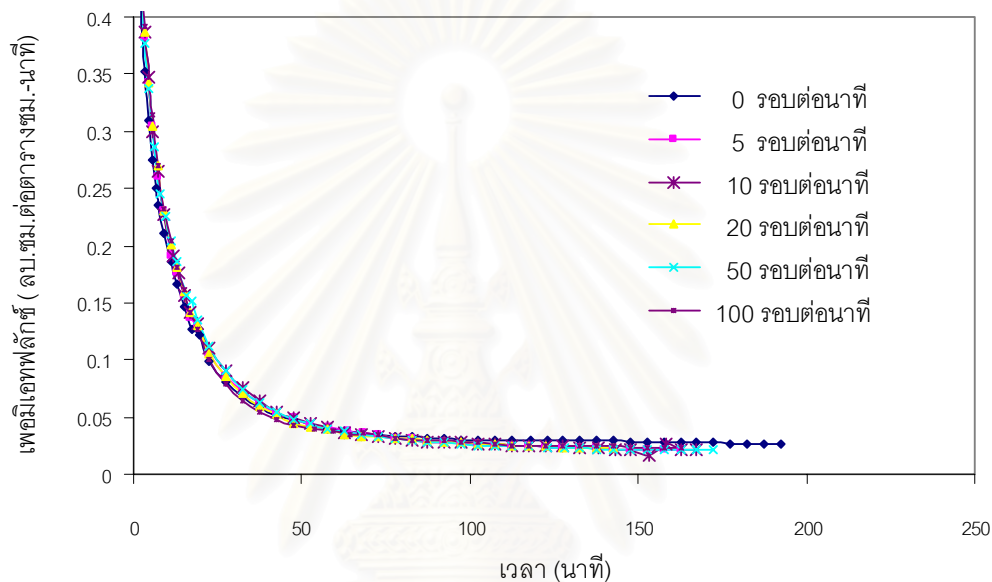
ในการศึกษาการกรองร่วมกับการหมุนของเยื่อแผ่น การหมุนของเยื่อแผ่นอาจทำให้เกิดแรงหนีศูนย์กลางย้อนกลับของน้ำหรือแรงเหวี่ยงของน้ำกลับเข้ามาในสายป้อน เป็นผลให้ความดันลดในระบบเพิ่มขึ้นจึงอาจส่งผลให้ความดันคร่อมเยื่อแผ่นลดลง ดังนั้นจึงทำการทดลองวัดค่าฟลักซ์การกรองของน้ำเปล่ากรณีหมุนเยื่อแผ่นที่ความเร็วรอบต่างกัน เพื่อยืนยันว่าการหมุนในช่วงที่ทำการทดลองคือ 5-100 รอบต่อนาที ไม่ทำให้ความดันคร่อมเยื่อแผ่นเปลี่ยนไปซึ่งส่งผลให้ค่าฟลักซ์น้ำเปล่าเปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งผลการทดลองแสดงในรูปที่ 6.5 พบว่า ฟลักซ์การกรองของน้ำเปล่าไม่ต่างกันเมื่อหมุนด้วยความเร็วรอบต่างๆ จึงสามารถยืนยันได้ว่าความเร็วรอบในช่วงที่ทำการทดลองไม่ส่งผลต่ออิทธิพลของการหมุนต่อความดันคร่อมเยื่อแผ่น นั่นคือแรงหนีศูนย์กลางย้อนกลับของน้ำมีค่าน้อยมาก



รูปที่ 6.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเพอมีเอทฟลักซ์ของน้ำเปล่าและเวลา ที่ความเร็วรอบในการหมุน 0, 5, 20, 100 รอบต่อนาที
(ความเร็วสายป้อน 0.06 เมตรต่อวินาที, ความดันคร่อมเยื่อแผ่น 0.35 บาร์)

- กรณีไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง

กรณีเมื่อทำการเปลี่ยนค่าความเร็วรอบในการหมุน 5, 10, 20, 50 และ 100 รอบต่อนาที ที่ความเร็วสายป้อน 0.06 เมตรต่อวินาที ความเข้มข้นสายป้อน 10 กรัมต่อลิตร ความดันคร่อมเยื่อแผ่น 0.22 บาร์ และไม่ใช้คลื่นเหนือเสียง พบว่าช่วงความเร็วรอบในการหมุนที่จะใช้ในงานวิจัยนี้ไม่มีผลต่อฟลักซ์การกรองตงผลการทดลองแสดงในรูปที่ 6.6



รูปที่ 6.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอมีเอทฟลักซ์และเวลา ในกรณีที่ไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 0, 10, 20, 50 และ 100 รอบต่อนาที ตามลำดับ (ความเร็วสายป้อน 0.06 เมตรต่อวินาที, ความเข้มข้นของสารละลายยีสต์ 10 กรัมต่อลิตร, ความดันคร่อมเยื่อแผ่น 0.22 บาร์)

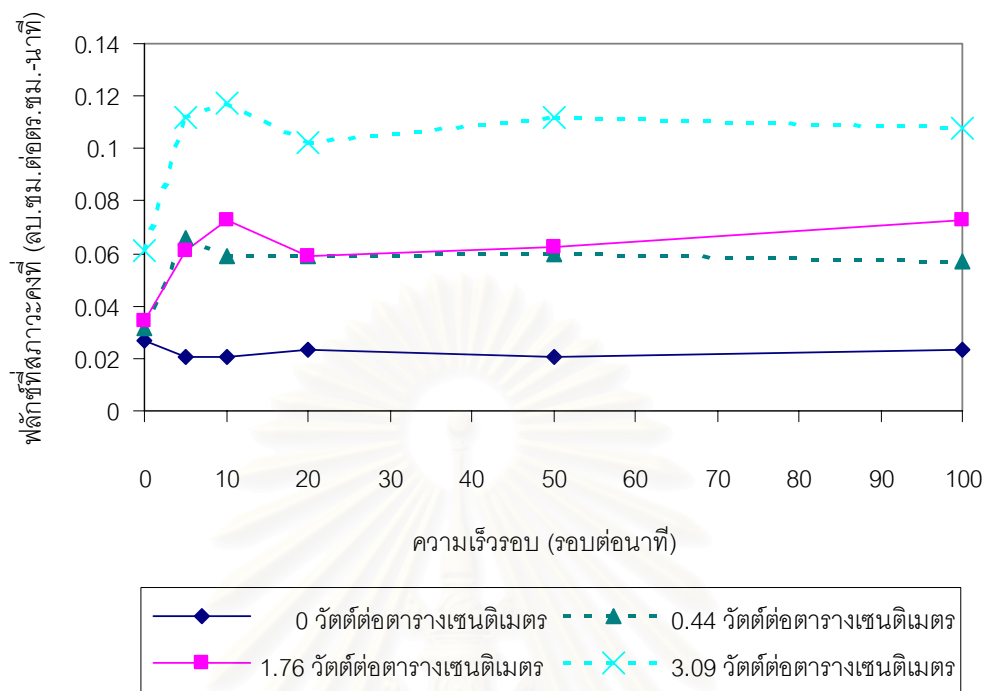
จากกราฟจะเห็นได้ชัดว่าที่ความเร็วรอบสูงขึ้นเพอมีเอทฟลักซ์ที่วัดได้ยังคงมีค่าใกล้เคียงกับเมื่อความเร็วรอบต่ำหรือเมื่อไม่หมุนเยื่อแผ่นตลอดการทดลอง สามารถอธิบายได้ว่าสำหรับระบบและสภาวะที่ใช้ในการทดลองเป็นช่วงที่ไม่มีเกิดการหมุนวนของสารละลายของเทย์เลอร์ (Taylor Vortice) [จากรูปที่ 3.4 การหมุนวนของสารละลายของเทย์เลอร์จะเกิดก็ต่อเมื่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ตามแนวแกนต้องมีค่าไม่เกิน 100 ดังนั้นค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่คำนวณได้จากการทดลองเท่ากับ 2760 จึงเป็นช่วงการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) โดยไม่เกิดการหมุนวนแบบเทย์เลอร์]

ดังนั้นผลการทดลองนี้สอดคล้องกับการคำนวณ คือ ในระบบและสภาวะการหมุนที่ใช้ในการทดลองจะไม่ส่งผลในการเพิ่มพลังการกรอง และไม่เกิดแรงหนีศูนย์กลางย้อนกลับของน้ำด้วยดังที่ได้ทดลองมาแล้ว สรุปได้ว่าการทดลองเมื่อมีการใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมกับกระบวนการแบบท่อหมุน จึงสามารถยืนยันได้ว่าการเปลี่ยนแปลงค่าพลังการกรองจะเป็นผลเนื่องมาจากคลื่นเหนือเสียงเท่านั้น

- *กรณีมีการใช้คลื่นเหนือเสียง*

กรณีเมื่อใช้คลื่นเหนือเสียงที่ความเข้มของคลื่นเหนือเสียง 0.44, 1.76 และ 3.09 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ความเร็วรอบในการหมุน 5, 10, 20, 50 และ 100 รอบต่อนาที ความเร็วสายป้อน 0.06 เมตรต่อวินาที ความดันคร่อมเยื่อแผ่น 0.22 บาร์ ความเข้มข้นของสายป้อน 10 กรัมต่อลิตร ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 6.7 พบว่าทั้งกรณีที่ไม่มีการหมุนของเยื่อแผ่น และมีการหมุนของเยื่อแผ่น คลื่นเหนือเสียงสามารถเพิ่มพลังการกรองได้ คือ กรณีเมื่อความเข้มของคลื่นเหนือเสียง 0.44 และ 1.76 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ความเร็วรอบในการหมุนต่างๆ 5, 10, 20, 50 และ 100 รอบต่อนาที จะให้ค่าพลังการกรองที่ใกล้เคียงกันคือประมาณ 0.055-0.06 ลบ.ซม.ต่อตร.ซม.-นาที่ โดยจะมีค่าพลังการกรองสูงขึ้นเฉลี่ยประมาณ 1.9 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่มีการหมุนของเยื่อแผ่น และที่ความเข้มของคลื่นเหนือเสียง 3.09 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ผลที่ได้มีลักษณะเช่นเดียวกัน คือคลื่นเหนือเสียงสามารถช่วยให้พลังการกรองเพิ่มขึ้นมีค่าใกล้เคียงกันที่ทุกความเร็วรอบในการหมุน คือประมาณ 0.1 ลบ.ซม.ต่อตร.ซม.-นาที่ หรือคิดเป็นพลังการกรองสูงขึ้นเฉลี่ยประมาณ 1.8 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่มีการหมุนของเยื่อแผ่น

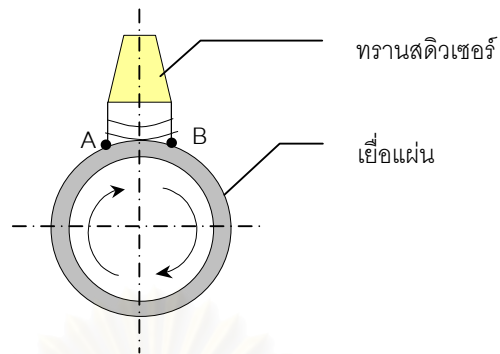
สำหรับกรณีที่มีการหมุนของเยื่อแผ่น ผลการทดลองแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการหมุนของเยื่อแผ่นเป็นการเพิ่มพื้นที่ในการกำจัดอนุภาคเนื่องจากผลของคลื่นเหนือเสียง เนื่องจากพลังการกรองมีค่าสูงขึ้นอย่างชัดเจนแม้ที่ความเร็วรอบต่างๆ และสำหรับในช่วงของความเร็วรอบที่ทำการศึกษา ผลของความเร็วรอบไม่มีผลต่อค่าพลังการกรองที่เพิ่มขึ้นที่ทุกๆ ความเข้มของคลื่นเหนือเสียง



รูปที่ 6.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและค่าฟลักซ์ที่สภาวะคงที่ เมื่อมีการใช้คลื่นเหนือเสียงที่มีความเข้มเท่ากับ 0, 0.44, 1.76 และ 3.09 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (ความเร็วสายป้อน 0.06 เมตรต่อวินาที, ความเข้มข้นสารละลายยีสต์ 10 กรัมต่อลิตร, ความดันคร่อมเยื่อแผ่น 0.22 บาร์)

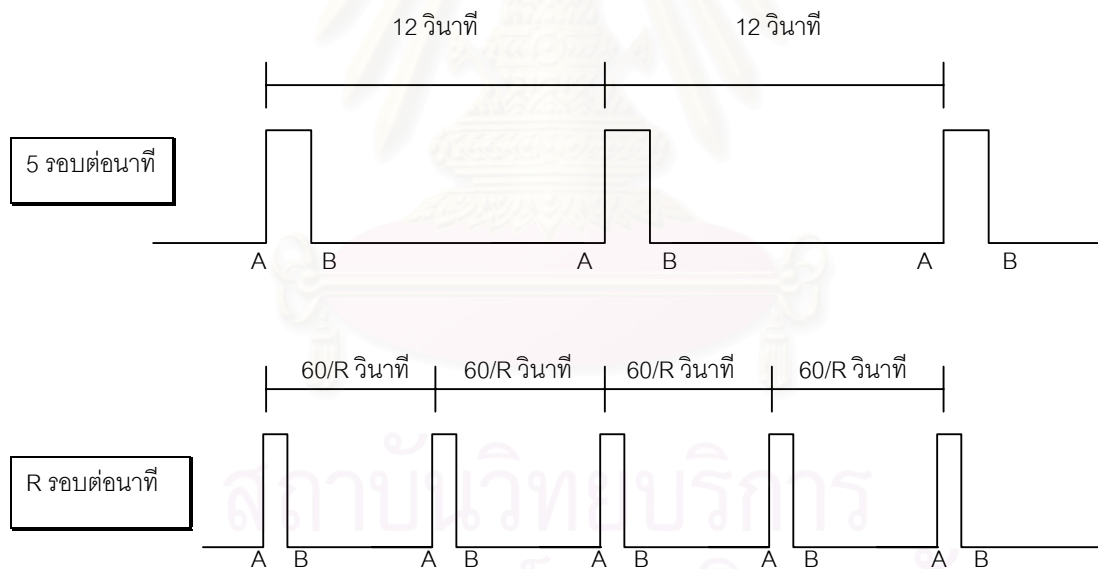
โดยในการศึกษาความสัมพันธ์ของความเร็วรอบที่มีผลต่ออิทธิพลของคลื่นเหนือเสียงจะต้องคำนึงถึงช่วงเวลาที่คลื่นเหนือเสียงตกกระทบเยื่อแผ่นกับคาบเวลาของคลื่นเหนือเสียงหรือช่วงเวลาในการยุบตัวของคาวิตีชัน และ ความสัมพันธ์ของช่วงเวลาของพื้นที่บนเยื่อแผ่นที่ได้รับผลของคลื่นเหนือเสียงกับความเร็วรอบที่ใช้ ดังนี้

กรณีหมุนเยื่อแผ่นด้วยความเร็วรอบต่างๆกันนั้นจะมีช่วงเวลาในการสัมผัสคลื่นเหนือเสียงที่ไม่เท่ากันในแต่ละรอบ แต่ภายในระยะเวลาที่เท่ากันนั้นช่วงเวลาทั้งหมดที่เยื่อแผ่นสามารถสัมผัสคลื่นเหนือเสียงมีระยะเวลาเท่ากัน โดยสมมุติให้คลื่นเหนือเสียงส่งผ่านไปยังเยื่อแผ่นที่ระยะ AB ดังรูป 6.8 โดยสามารถคำนวณหาเวลาที่ระยะ AB สัมผัสคลื่นเหนือเสียงได้ ดังรูปที่ 6.9



รูปที่ 6.8 ภาพตัดขวางแสดงการหมุนของเยื่อแผ่นขณะมีการใช้คลื่นเหนือเสียง

หมายเหตุ: สมมติ ระยะ AB มีค่าเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง คือมีค่าเท่ากับ 2.8 เซนติเมตร



รูปที่ 6.9 แสดงคาบของจุดใดๆบนเยื่อแผ่นเมื่อสัมผัสคลื่นเหนือเสียง

สมมติความเร็วรอบในการหมุนเท่ากับ R รอบต่อนาที

ในการหมุน 1 รอบ เป็นระยะทาง (AA) 15 ซม. ใช้เวลานาน $60/R$ วินาที
 ในการหมุน 1 รอบระยะสัมผัสคลื่นเหนือเสียง (AB) 2.8 ซม. ใช้เวลานาน $(60 \times 2.8)/(15 \times R)$ วินาที
 ดังนั้นในเวลา 1 นาที ซึ่งหมุน R รอบ เวลาในการสัมผัสคลื่นเหนือเสียง $(60 \times 2.8)/15 = 11.2$ วินาที

เมื่อพิจารณาในช่วงเวลา ดังรูป 6.9 เวลาทั้งหมดที่จุด AB สัมผัสคลื่นเหนือเสียงใน 1 นาที เมื่อรวมกันแล้วจะเท่ากับ 11.2 วินาที ที่ทุกความเร็วรอบ นั่นคือไม่ว่าจะหมุนเยื่อแผ่นด้วยความเร็วรอบเท่าใดก็จะทำให้แต่ละจุดสัมผัสคลื่นเหนือเสียงเป็นระยะเวลาเท่ากัน ดังการคำนวณที่ความเร็วรอบต่างๆ ในตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 แสดงเวลาของเยื่อแผ่นในสัมผัสคลื่นเหนือเสียงที่ความเร็วรอบต่างๆ

ความเร็วรอบในการหมุน (รอบต่อนาที)	เวลาในการสัมผัสคลื่นเหนือเสียงใน 1 รอบ (AA) (วินาที)	เวลาในการสัมผัสคลื่นเหนือเสียงของระยะ AB ในแต่ละรอบ (วินาที)	เวลาในการสัมผัสคลื่นเหนือเสียงของระยะ AB ใน 1 นาที (วินาที)
5	12	2.24	11.2
10	6	1.12	11.2
20	3	0.56	11.2
50	1.2	0.22	11.2
100	0.6	0.11	11.2
R	$60/R$	$(60 \times 2.8)/(15 \times R)$	11.2

จากตารางที่ 6.2 จะเห็นว่า เมื่อความเร็วรอบในการหมุนของเยื่อแผ่นสูงขึ้น เวลาที่พื้นที่ของเยื่อแผ่นในระยะ AB ที่มีโอกาสสัมผัสกับคลื่นเหนือเสียงมีค่าลดลง จนเมื่อความเร็วรอบสูงสุดในงานวิจัยนี้ คือ 100 รอบต่อนาที พบว่าเวลาดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 0.11 วินาที อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบคาบเวลาของคลื่นเหนือเสียงที่ใช้ในการทดลองซึ่งมีค่าความถี่เท่ากับ 28 กิโลเฮิรตซ์ ดังนั้นมีคาบเวลาเท่ากับ 40 ไมโครวินาที และเวลาในการเกิดควาวิเทชันซึ่งจะเกิดขึ้นในเวลาที่รวดเร็วมากคือในระดับนาโนวินาที [ดังทฤษฎีในหัวข้อ 4.1] จะเห็นได้ว่าเวลาดังกล่าวมีค่ามากกว่ามาก ดังนั้นระยะเวลาในการสัมผัสคลื่นเหนือเสียงในแต่ละรอบในการตีหมุนเยื่อแผ่นจึงไม่น่าส่งผลต่อคาบเวลาของคลื่นเหนือเสียงและการเกิดปรากฏการณ์ควาวิเทชัน

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบที่มีผลต่ออิทธิพลของคลื่นเหนือเสียงในการเพิ่มพลังการกรองนั้นสรุปได้ว่าปัจจัยที่ทำให้คลื่นเหนือเสียงมีผลในการเพิ่มพลังการกรองกรณีหมุนเยื่อแผ่น คือ ช่วงเวลาในการสัมผัสคลื่นเหนือเสียงซึ่งมีค่าเท่ากันที่ทุกความเร็วรอบในการหมุนของเยื่อแผ่น นั่นคือการใช้คลื่นเหนือเสียงส่งผ่านไปยังเยื่อแผ่นที่กำลังหมุนถึงแม้จะหมุนด้วยความเร็วรอบที่ต่างกัน แต่เวลาที่เยื่อแผ่นสัมผัสคลื่นเหนือเสียงทั้งหมดก็จะมีค่าเท่ากัน ทำให้อิทธิพลของคลื่นเหนือเสียงในการลดการสะสมของอนุภาคใกล้เคียงกันในทุกความเร็วรอบในการหมุน พลังการกรองจึงมีค่าใกล้เคียงกันด้วย

เมื่อพิจารณาค่าความต้านทานการกรองดังตารางที่ 6.3 พบว่าความต้านทานการกรองรวม (R_T) ในกรณีที่มีการใช้คลื่นเหนือเสียงมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อทำการหมุนที่ความเร็วรอบต่างๆในช่วงที่ทำการทดลอง ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าคลื่นเหนือเสียงสามารถลดการสะสมของอนุภาคบนผิวเยื่อแผ่นได้ใกล้เคียงกันในทุกความเร็วรอบของการหมุนของเยื่อแผ่น



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 6.3 แสดงค่าความต้านทานการทรงตัวที่ความเข้มข้นของคลื่นเหนือเสียงและความเร็วรอบในการหมุนต่าง ๆ

ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	0 วัตต์ต่อตร.ซม.			0.44 วัตต์ต่อตร.ซม.			1.76 วัตต์ต่อตร.ซม.			3.09 วัตต์ต่อตร.ซม.			
	R_M	R_C	R_T	R_M	R_C	R_T	R_M	R_C	R_T	R_M	R_C	R_T	
0	13.49	620.50	-0.97	633.02	529.50	1.12	544.01	486.70	0.95	497.38	268.34	0.67	280.78
5	14.51	813.95	0.50	828.96	238.59	9.14	259.82	259.80	6.70	280.78	140.86	1.95	152.70
10	10.49	818.78	-0.31	828.96	278.37	0.74	290.14	224.76	0.25	235.25	121.99	15.46	150.07
20	13.39	710.46	1.49	725.34	278.68	0.57	290.14	268.36	8.37	290.14	153.46	1.13	167.39
50	10.24	817.80	0.92	828.96	256.18	4.88	272.00	258.40	0.80	272.00	129.80	12.03	152.70
100	9.78	715.78	-0.21	725.34	288.84	0.94	300.14	224.09	0.80	235.25	145.26	2.50	158.26

หน่วย : $\times 10^6$ (1/เซนติเมตร)

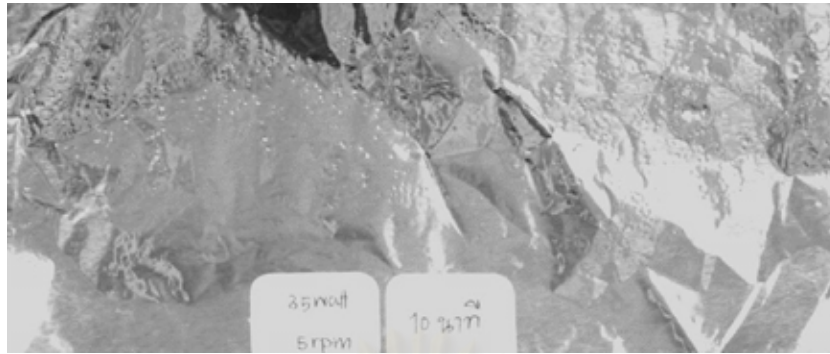
(สภาวะของการทดลอง: ความเร็วสายป้อน 0.06 เมตรต่อนาที, ความดันक्रमเยื่อแผ่น 0.22 บาร์, ความเข้มข้นสารละลายยีสต์ 10 กรัมต่อลิตร)

นอกจากนั้นได้ทำการทดลอง 3 การทดลอง เพื่อศึกษาผลของความเร็วยอบในการหมุนที่มีผลต่อปรากฏการณ์คาวิตีชันเนื่องจากการใช้คลื่นเหนือเสียง คือ การเจาะทะลุบนอลูมิเนียมพอยล์ การเรืองแสงด้วยสารเคมี และการกำจัดอนุภาคดินเหนียว โดยมีผลการทดลองดังต่อไปนี้

1) การเจาะทะลุบนอลูมิเนียมพอยล์

เมื่อคลื่นเหนือเสียงความเข้มสูงเคลื่อนที่ผ่านของเหลวและตกกระทบบนผิวของของแข็งในที่นี้คืออลูมิเนียมพอยล์จะทำให้เกิดคาวิตีชันเนื่องจากเกิดการยุบตัวที่ไม่สมมาตรจากจุดกำเนิดฟองบนผิวของอลูมิเนียมพอยล์ทำให้เกิดแรงเจาะทะลุ (Pitting Force) เป็นรูซึ่งสังเกตได้ด้วยตาเปล่า ผลของการหมุนของเยื่อแผ่นที่มีต่อปริมาณคาวิตีชันที่เกิดขึ้นบนผิวเยื่อแผ่นสังเกตได้จากปริมาณและบริเวณรูที่เกิดขึ้นบนอลูมิเนียมพอยล์ซึ่งนำไปติดทับบนเยื่อแผ่น โดยทำการทดลองส่งคลื่นเหนือเสียงที่ความเข้ม 3.09 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตรและหมุนเยื่อแผ่นที่ความเร็วยอบ 5, 20 และ 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที (กรณีไม่มีการไหลของน้ำ) ผลจากการเจาะทะลุบนอลูมิเนียมพอยล์ที่ทำการทดลองแสดงดังรูปที่ 6.10 (ก), (ข) และ (ค) พบว่าเมื่อหมุนเยื่อแผ่นที่ความเร็วยอบมากขึ้น จะทำให้มีปริมาณรูบนอลูมิเนียมพอยล์มากขึ้น ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการหมุนเยื่อแผ่นด้วยความเร็วยอบมากขึ้น จะทำให้เกิดการเจาะทะลุซึ่งเกิดเนื่องจากการยุบตัวที่ไม่สมมาตรของคาวิตีชันบนผิวอลูมิเนียมพอยล์มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความเร็วยอบในการหมุนที่มีมากขึ้นทำให้เกิดจุดที่ทำให้คาวิตีชันสามารถเกิดได้ง่ายขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากความเร็วในการหมุนที่มากขึ้นทำให้เกิดการปั่นกววนของน้ำขึ้นในระบบ

ดังนั้นเพื่อให้การปั่นกววนภายในระบบเท่ากัน จึงได้ทำการทดลองโดยให้ความเร็วของน้ำในแนวแกนด้วยโดยการปั้มน้ำให้มีการไหลเวียนซึ่งทำให้ผลจากการปั่นกววนในการหมุนมีน้อยลง ผลการทดลองแสดงดังรูป 6.11 (ก), (ข) และ (ค) พบว่าหากมีการไหลของน้ำไม่ว่าเยื่อแผ่นจะมีความเร็วยอบน้อยหรือมาก ก็จะทำให้ปริมาณของคาวิตีชันที่เกิดบนอลูมิเนียมพอยล์มีค่าใกล้เคียงกัน สังเกตได้จากปริมาณรูที่เกิดขึ้นบนอลูมิเนียมพอยล์มีจำนวนใกล้เคียงกัน



(ก)

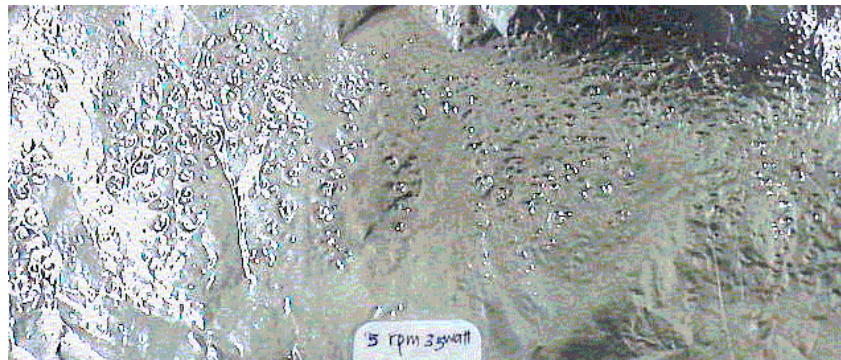


(ข)



(ค)

รูปที่ 6.10 การใช้ลूमินิเยมฟอยล์ทดสอบความเข้มและบริเวณที่คลื่นเหนือเสียงเคลื่อนที่ผ่าน ที่ความเข้มของคลื่นเหนือเสียง 3.09 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 10 นาที กรณีหมุนเยื่อแผ่นที่ความเร็วรอบต่างกัน (ไม่มีการไหลของน้ำ)
 (ก) 5 รอบต่อนาที (ข) 20 รอบต่อนาที (ค) 100 รอบต่อนาที



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 6.11 การใช้ลูมิเนียมฟอสฟอรัสทดสอบความเข้มและบริเวณที่คลื่นเหนือเสียงผ่าน ที่ความเข้ม 3.09 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 10 นาที กรณีหมุนเยื่อแผ่นที่ความเร็วรอบต่างกัน (มีการไหลของน้ำ)

(ก) 5 รอบต่อนาที (ข) 20 รอบต่อนาที (ค) 100 รอบต่อนาที

2) การเรืองแสงด้วยสารเคมี

เมื่อคลื่นเหนือเสียงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่เป็นสารละลายยูมินอล (3-Aminophthalhydrazide) จะทำให้บริเวณที่เกิดคาวิเทชันแบบชั่วคราว (Transient Cavitation) เกิดการเรืองแสงเป็นแสงสีฟ้า ผลของการหมุนที่มีต่อคาวิเทชันสังเกตได้จากความเข้มและบริเวณในการเรืองแสง โดยเมื่อทำการทดลองส่งผ่านคลื่นเหนือเสียงที่ความเข้มของคลื่นเหนือเสียง 3.09 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และเปลี่ยนค่าความเร็วรอบในการหมุนที่ 5 และ 100 รอบต่อนาที (กรณีไม่มีการไหลของสารละลายยูมินอล) ผลการถ่ายภาพการเรืองแสงด้วยสารเคมีแสดงดังรูปที่ 6.12 (ก), (ข) และ (ค) [เป็นภาพถ่ายด้านข้างของการส่งคลื่นเหนือเสียงมายังเยื่อแผ่น ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 6.11(ก)] พบว่าบริเวณที่เกิดการเรืองแสงเมื่อทำการหมุนที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาทีจะเป็นบริเวณกว้างกว่าที่ความเร็วรอบ 5 รอบต่อนาที ดังนั้นการหมุนที่ความเร็วมากขึ้น (ประมาณ 100 รอบต่อนาที) จะทำให้คาวิเทชันแบบไม่คงตัว (Transient Cavitation) เกิดเป็นบริเวณกว้างขึ้น



(ก)

รูปที่ 6.12 ภาพถ่ายแสดงการเรืองแสงของสารเคมี (Chemiluminescence) เนื่องจากคลื่นเหนือเสียงที่ความเข้มของคลื่นเหนือเสียง 3.09 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร กรณีหมุนเยื่อแผ่นที่ความเร็วรอบต่างกัน

(ก) ภาพถ่ายขณะไม่มีการเรืองแสง (ข) 5 รอบต่อนาที (ค) 100 รอบต่อนาที



(ข)



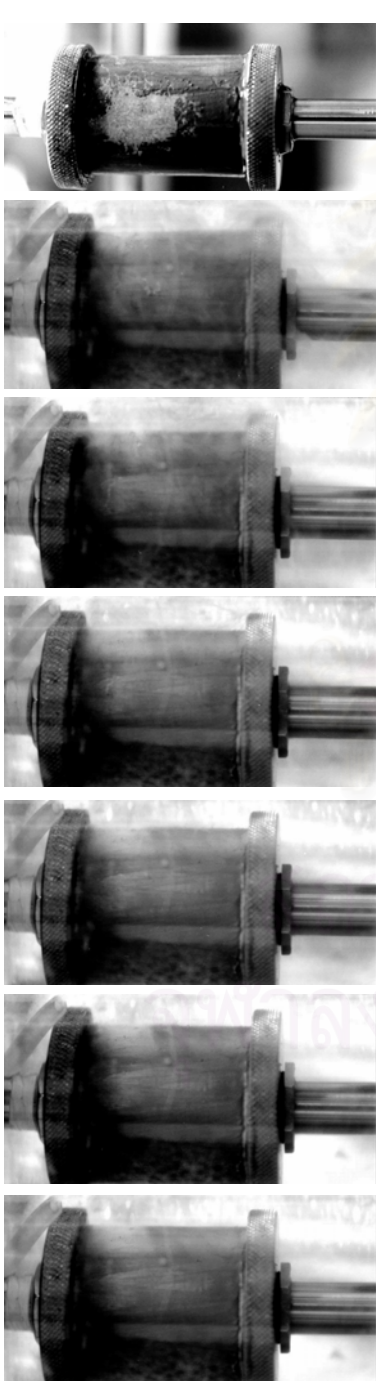
(ค)

รูปที่ 6.12 (ต่อ)ภาพถ่ายแสดงการเรืองแสงของสารเคมี (Chemiluminescence) เนื่องจากคลีน
 เหนือเสียงที่ความเข้มของคลีนเหนือเสียง 3.09 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร กรณี
 หมุนเยื่อแผ่นที่ความเร็วรอบต่างกัน
 (ก) ภาพถ่ายขณะไม่มีการเรืองแสง (ข) 5 รอบต่อนาที (ค) 100 รอบต่อนาที

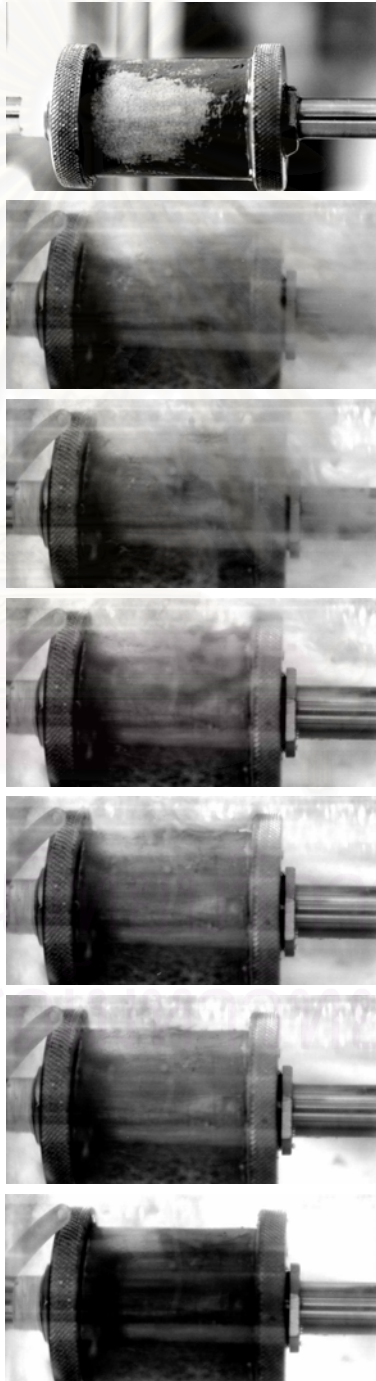
3) การกำจัดอนุภาคดินเหนียว

เมื่อส่งผ่านคลื่นเหนือเสียงไปยังดินเหนียวที่خابอยู่บนผิวเยื่อแผ่น เป็นเวลา 30 วินาที (กรณีไม่มีการไหลของน้ำ) จะสังเกตเห็นอนุภาคดินเหนียวค่อยๆหลุดออกจากเยื่อแผ่นซึ่งสังเกตได้จากความขุ่นของน้ำและบริเวณสีขาวซึ่งเป็นเยื่อแผ่นบริเวณที่ไม่มีดินเหนียวติดอยู่ ผลการกำจัดอนุภาคดินเหนียวบนผิวของเยื่อแผ่นเมื่อหมุนเยื่อแผ่นที่ความเร็วรอบ 0, 5, 20 และ 100 รอบต่อนาที ที่ความเข้มข้นของคลื่นเหนือเสียง 0.44, 1.76 และ 3.09 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 6.13, 6.14, 6.15 และ 6.16 พบว่า เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนค่าความเร็วรอบในการหมุน จะเห็นได้ว่าเมื่อไม่มีการหมุนของเยื่อแผ่น คลื่นเหนือเสียงสามารถกำจัดดินเหนียวบนผิวเยื่อแผ่นได้เฉพาะในบริเวณที่ตรงกับตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง แต่กรณีหมุนเยื่อแผ่นจะเห็นได้ว่าคลื่นเหนือเสียงสามารถกำจัดดินเหนียวได้ตลอดทั่วทั้งผิวเยื่อแผ่น และสังเกตได้ว่าที่ความเร็วรอบในการหมุนมากขึ้นก็จะสามารถกำจัดอนุภาคดินเหนียวบนผิวของเยื่อแผ่นได้มากขึ้นด้วย เนื่องจากการหมุนด้วยความเร็วรอบที่มากขึ้นการส่งผ่านคลื่นเหนือเสียงจะทำให้เกิดควาเวเทชันมากขึ้นดังได้กล่าวมาแล้ว

จากการทดลองทั้ง 3 ส่วนจะเห็นได้ว่าผลการทดลองเกี่ยวกับการศึกษาการเกิดปรากฏการณ์ควาเวเทชันเมื่อมีการหมุนเยื่อแผ่น มีกรณีที่สุดคล้องกับผลการทดลองของการกรองแบบหมุนเยื่อแผ่นที่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง คือกรณีที่ส่งคลื่นเหนือเสียงผ่านตัวกลางของเหลวไปยังออลูมิเนียมฟอยล์ที่สภาวะที่มีการไหลของน้ำจากปั้มเหมือนกับทดลอง ซึ่งพบว่าที่ความเร็วรอบในการหมุนช้าหรือเร็วก็ทำให้เกิดควาเวเทชันบนผิวเยื่อแผ่นได้เท่ากัน แต่ในกรณีที่น้ำไหลในทิศทางการหมุนเพียงอย่างเดียวโดยไม่มีการไหลในแนวแกน การหมุนด้วยความเร็วรอบที่มากขึ้นจะทำให้เกิดรูบนออลูมิเนียมฟอยล์มากขึ้นเนื่องจากความปั่นป่วนของของเหลวที่เกิดจากการหมุนทำให้เกิดจุดอ่อนซึ่งเอื้ออำนวยต่อการเกิดควาเวเทชัน จึงเป็นสาเหตุในการเกิดควาเวเทชันได้ง่ายขึ้นเมื่อหมุนด้วยความเร็วมากขึ้น ดังนั้นในการกรองสารละลายยีสต์ซึ่งมีการไหลของน้ำในแนวแกนด้วยเป็นผลให้ความปั่นป่วนเนื่องจากการหมุนมีอิทธิพลน้อยลง ความเร็วรอบจึงไม่มีอิทธิพลต่อการเพิ่มหรือลดผลของคลื่นเหนือเสียงในการกำจัดเค้ก จึงทำให้ผลลัพธ์การกรองใกล้เคียงกันในกรณีที่ใช้คลื่นเหนือเสียงที่ทุกความเร็วรอบในการหมุน



(ก) 0.44 วัดตัดต่อตารางเซนติเมตร , 0 รอบต่อนาที



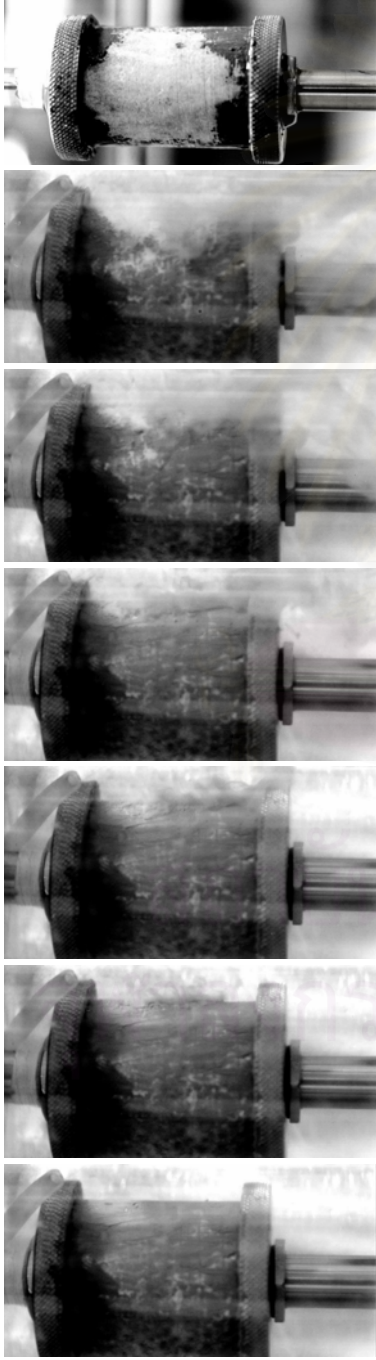
(ข) 1.76 วัดตัดต่อตารางเซนติเมตร , 0 รอบต่อนาที

รูปที่ 6.13 ภาพแสดงการกำจัดอนุภาคดินเหนียวบนเยื่อแผ่นโดยคลื่นเหนือเสียงเป็นเวลา 30 วินาที ที่ความเร็วรอบปีในการหมุน 0 รอบต่อนาที ที่ความเข้มของคลื่นเหนือเสียงต่างกัน

(ก) 0.44 วัดตัดต่อตารางเซนติเมตร

(ข) 1.76 วัดตัดต่อตารางเซนติเมตร

(ค) 3.09 วัดตัดต่อตารางเซนติเมตร



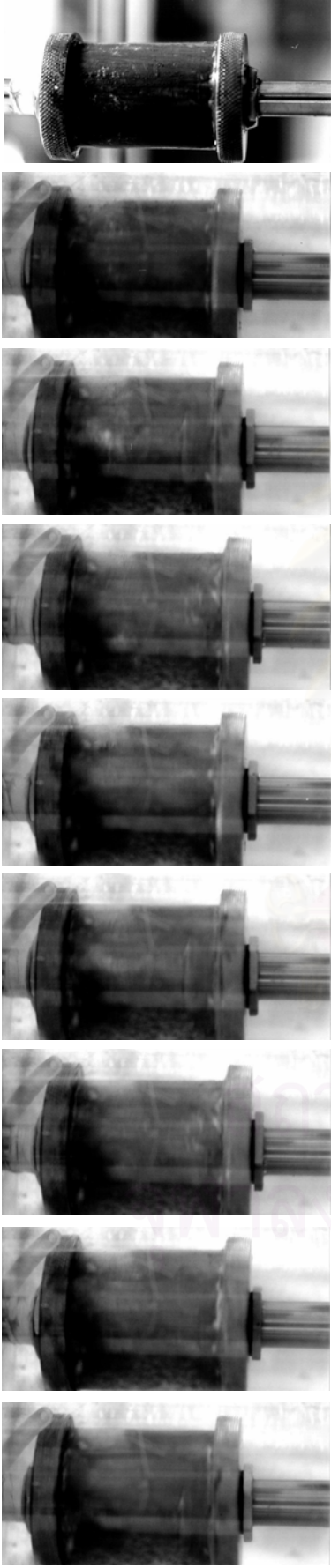
(ค) 3.09 วัดตัดต่อตารางเซนติเมตร , 0 รอบต่ออนาที

รูปที่ 6.13 (ต่อ) ภาพแสดงการกำจัดอนุภาคดินเหนียวบนเยื่อแผ่นโดยคลื่นเหนือเสียงเป็นระยะเวลา 30 วินาที ที่ความเร็วรอบในการหมุน 0 รอบต่ออนาที
 ที่ความเข้มของคลื่นเหนือเสียงต่างกัน

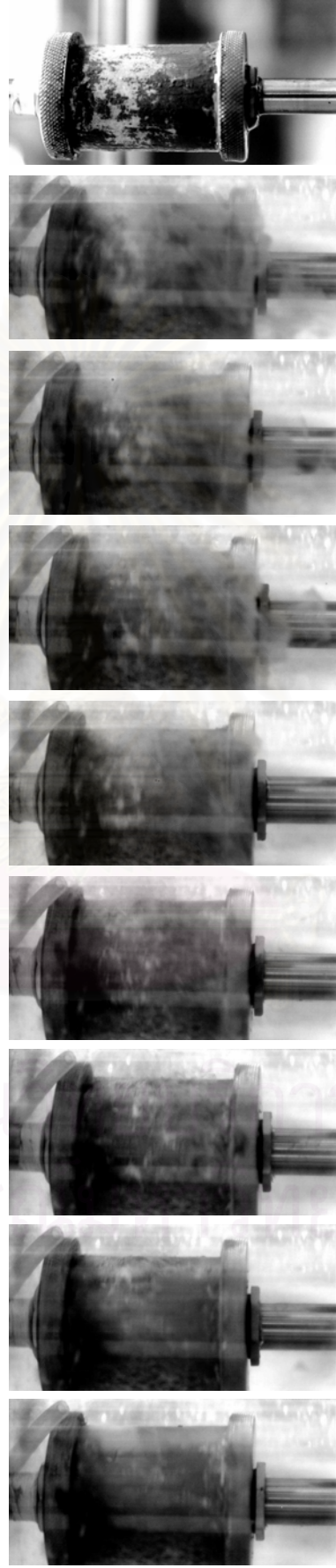
(ก) 0.44 วัดตัดต่อตารางเซนติเมตร

(ข) 1.76 วัดตัดต่อตารางเซนติเมตร

(ค) 3.09 วัดตัดต่อตารางเซนติเมตร



(ก) 0.44 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร , 5 รอบต่อนาที



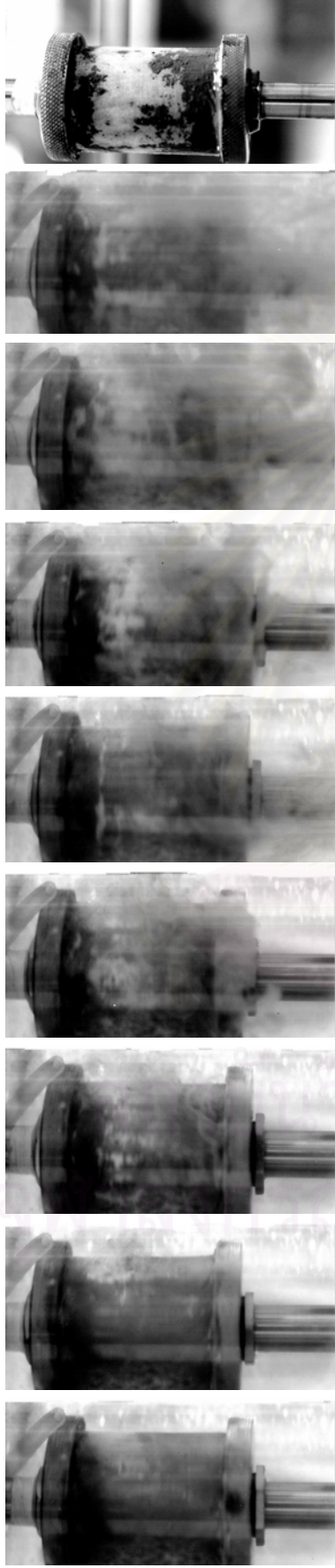
(ข) 1.76 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร , 5 รอบต่อนาที

รูปที่ 6.14 ภาพแสดงการกำจัดอนุภาคดินเหนียวบนเยื่อแผ่นโดยคลื่นเหนือเสียงเป็นเวลา 30 วินาที ที่ความเร็วรอบในการหมุน 5 รอบต่อนาที ที่ความเข้มของคลื่นเหนือเสียงต่างกัน

(ก) 0.44 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

(ข) 1.76 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

(ค) 3.09 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร



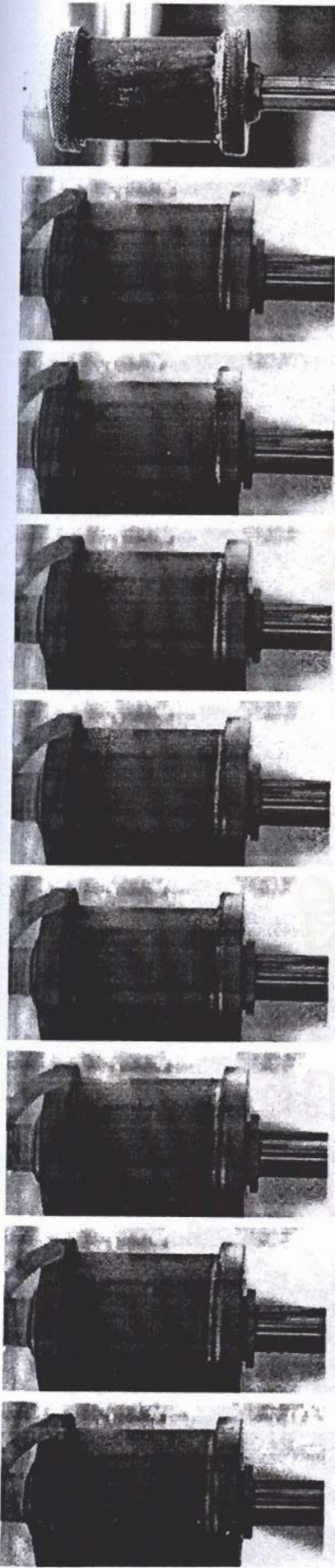
(ค) 3.09 วัสดุตัดตารางเซนต์ิเมตร , 5 รอบต่อนาที

รูปที่ 6.14 (ต่อ) ภาพแสดงการกำจัดอนุภาคดินเหนียวบนเยื่อแผ่นโดยคลื่นเหนือเสียงเป็นเวลา 30 วินาที ที่ความเร็วรอบในการหมุน 5 รอบต่อนาที ที่ความเข้มของคลื่นเหนือเสียงต่างๆ

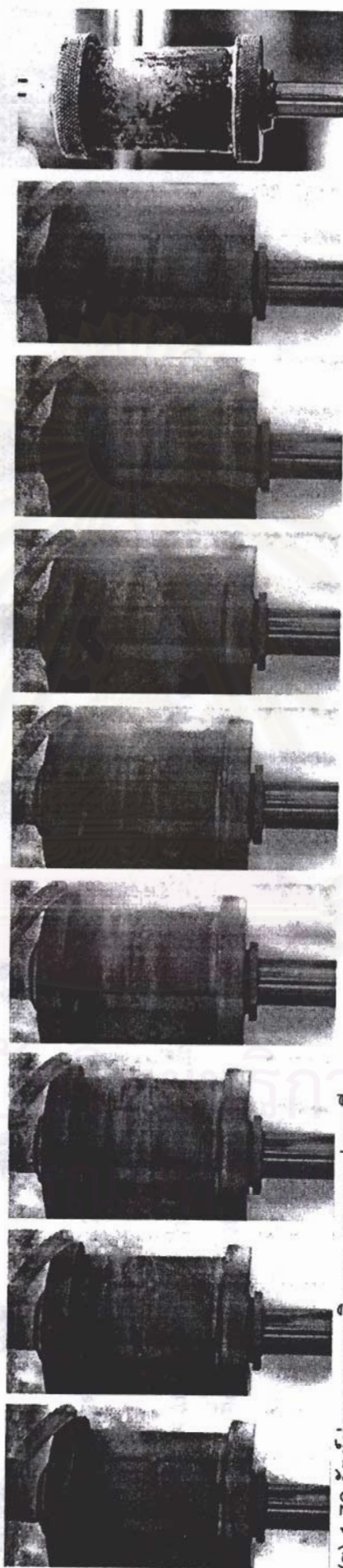
(ก) 0.44 วัสดุตัดตารางเซนต์ิเมตร

(ข) 1.76 วัสดุตัดตารางเซนต์ิเมตร

(ค) 3.09 วัสดุตัดตารางเซนต์ิเมตร



(ก) 0.44 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร , 20 รอบต่อนาที



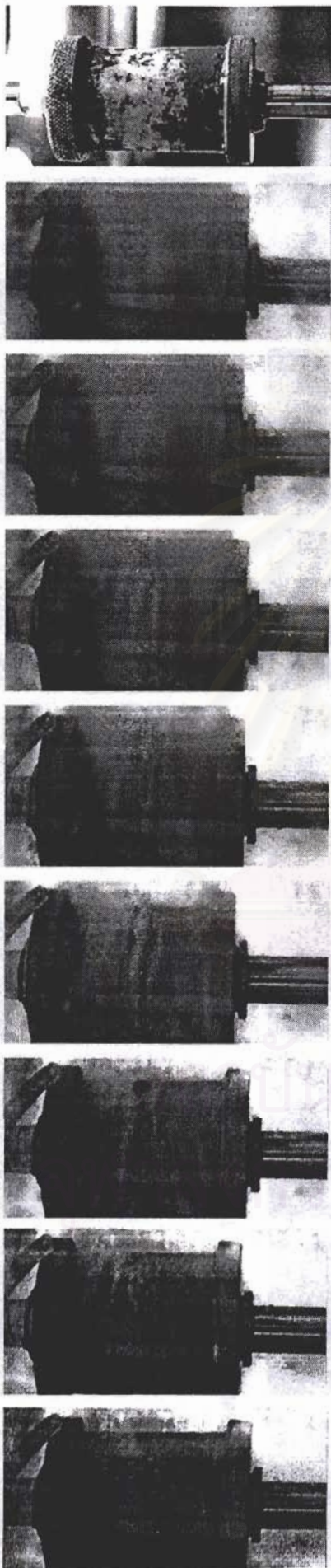
(ข) 1.76 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร , 20 รอบต่อนาที

รูปที่ 6.15 แสดงการกำจัดอนุภาคดินเหนียวบนเยื่อแผ่นโดยคลื่นเหนือเสียงเป็นเวลา 30 วินาที ที่ความเร็วรอบในการหมุน 20 รอบต่อนาที ที่ความเข้มของคลื่นเหนือเสียงต่างกัน

(ก) 0.44 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

(ข) 1.76 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

(ค) 3.09 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร



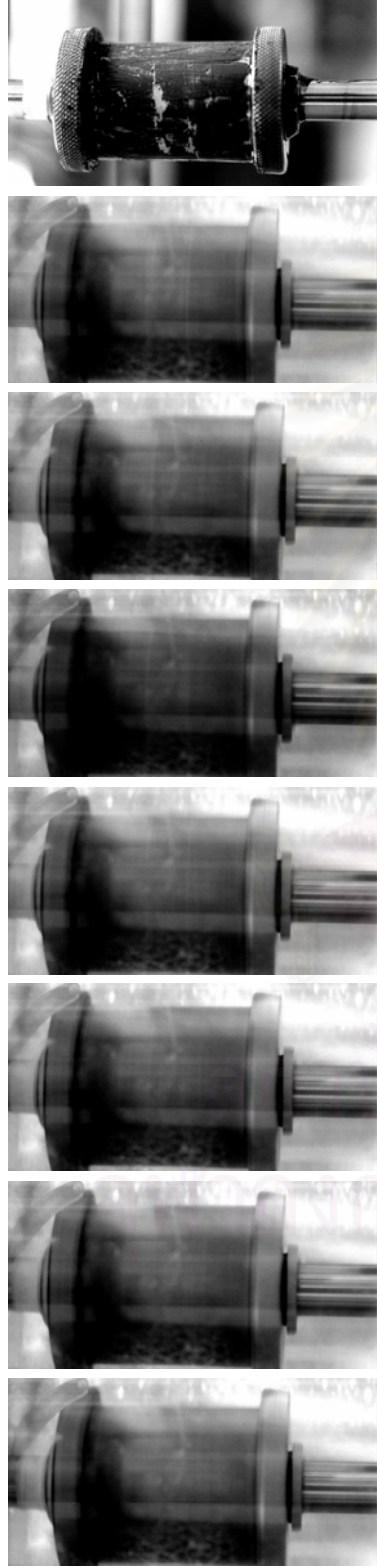
(ค) 3.09 วัดต่อตารางเซนติเมตร . 20 รอบต่อนาที

รูปที่ 6.15 (ต่อ) แสดงการกำจัดอนุภาคดินเหนียวบนเยื่อแผ่นโดยคลื่นเหนือเสียงเป็นเวลา 30 วินาที ที่ความเร็วรอบในการหมุน 20 รอบต่อนาที ที่ความเข้มของคลื่นเหนือเสียงต่างกัน

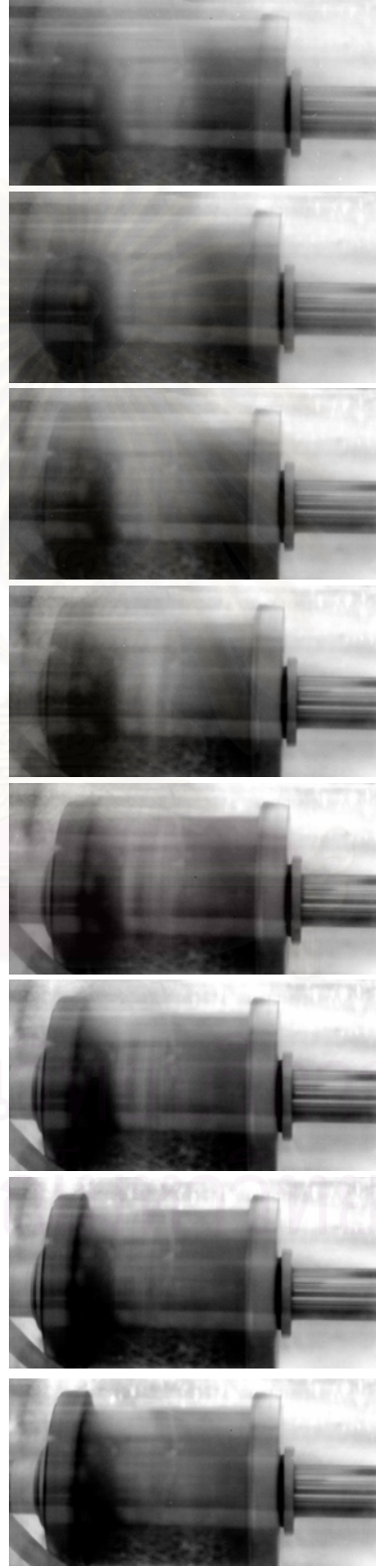
(ก) 0.44 วัดต่อตารางเซนติเมตร

(ข) 1.76 วัดต่อตารางเซนติเมตร

(ค) 3.09 วัดต่อตารางเซนติเมตร



(ก) 0.44 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร , 100 รอบต่อนาที



(ข) 1.76 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร , 100 รอบต่อนาที

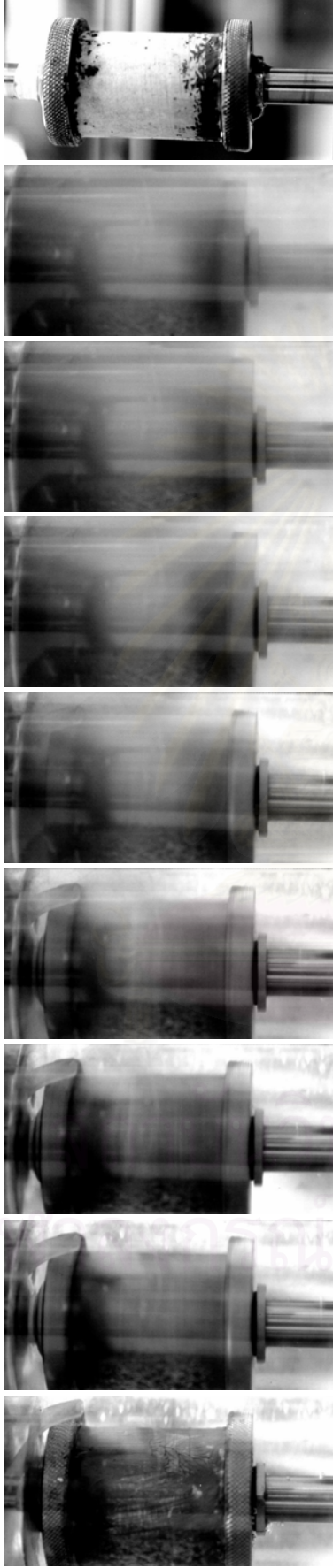
รูปที่ 6.16 แสดงผลการกำจัดอนุภาคดินเหนียวบนเยื่อแผ่นโดยคลื่นเหนือเสียงเป็นเวลา 30 วินาที ที่ความเร็วรอบใบนการหมุน 100 รอบต่อนาที ที่ความเข้มของคลื่นเหนือเสียงต่างกัน

(ก) 0.44 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

(ข) 1.76 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

(ค) 3.09 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร





(ค) 3.09 วัดตัดต่อตารางเซนติเมตร , 100 รอบต่ออนาที

รูปที่ 6.16 (ต่อ) แสดงผลการกำจัดอนุภาคดินเหนียวบนเยื่อแผ่นโดยคลื่นเหนือเสียงเป็นเวลา 30 วินาที ที่ความเร็วรอบในการหมุน 100 รอบต่ออนาที ที่ความเข้มของคลื่นเหนือเสียงต่างกัน

(ก) 0.44 วัดตัดต่อตารางเซนติเมตร

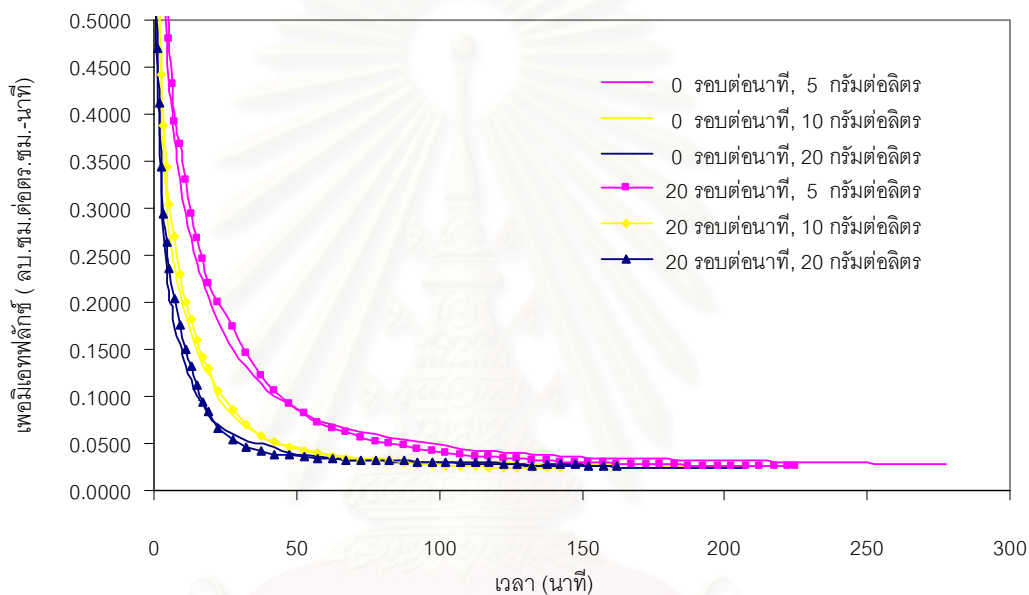
(ข) 1.76 วัดตัดต่อตารางเซนติเมตร

(ค) 3.09 วัดตัดต่อตารางเซนติเมตร

6.1.2 ความเข้มข้นของสายป้อน

- กรณีไม่ใช้คลื่นเหนือเสียง

กรณีเมื่อทำการเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของสารละลายยีสต์ 5, 10 และ 20 กรัมต่อลิตร ที่ความเร็วสายป้อน 0.06 เมตรต่อวินาที ความดันคร่อมเยื่อแผ่น 0.22 บาร์ ความเร็วรอบในการหมุน 0 และ 20 รอบต่อวินาที ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 6.17



รูปที่ 6.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอมีเอทฟลักซ์และเวลา กรณีไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง เมื่อไม่หมุนเยื่อแผ่นและหมุนเยื่อแผ่นที่ความเร็วรอบ 20 รอบต่อวินาที ที่ความเข้มข้นสารละลายยีสต์ 5, 10 และ 20 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ (ความเร็วสายป้อน 0.06 เมตรต่อวินาที, ความดันคร่อมเยื่อแผ่น 0.22 บาร์, ความเข้มข้นของคลื่นเหนือเสียง 0 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร)

จากการทดลองพบว่าทั้งกรณีเมื่อไม่มีการหมุนเยื่อแผ่นและมีการหมุนเยื่อแผ่น ฟลักซ์การกรองที่สภาวะคงที่มีค่าใกล้เคียงกันคือประมาณ 0.027 มิลลิลิตรต่อตารางเซนติเมตร-นาที่ แสดงว่าค่าฟลักซ์ที่สภาวะคงที่ไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารละลายยีสต์ (ในช่วงค่าความเข้มข้นที่ทำการทดลอง) แต่ทำให้เข้าสู่สภาวะการกรองเร็วขึ้น โดยที่ความเข้มข้นของสารละลายยีสต์ 10 และ 20 กรัมต่อลิตร จะเข้าสู่สภาวะคงที่ที่ประมาณ 160 นาที และที่ 5 กรัมต่อลิตร จะเข้าสู่

สภาวะคงที่ที่ประมาณ 220 นาที ทั้งนี้เนื่องมาจากความเข้มข้นของสารละลายยีสต์มากมีผลทำให้ อัตราการเกิดเค้กมากในช่วงแรกเนื่องจากมีอนุภาคอยู่ในระบบมาก ส่งผลให้ฟลักซ์การกรองลดลงอย่างรวดเร็ว ฟลักซ์การกรองจึงเข้าสู่สภาวะคงที่เร็ว แต่เมื่อเวลาใกล้สภาวะคงที่ที่ความเข้มข้นของ สารละลายยีสต์ต่างกันก็จะมีปริมาณอนุภาคที่สะสมอยู่บนผิวเยื่อแผ่นหรือชั้นเค้กในปริมาณที่ ใกล้เคียงกันดังจะเห็นได้จากค่าความต้านทานการกรองดังตารางที่ 6.4 พบว่าค่าความต้านทาน การกรอง (R_f) เมื่อไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง ที่ 5, 10 และ 20 กรัมต่อลิตรมีค่าไม่ต่างมากนัก

ตารางที่ 6.4 แสดงค่าความต้านทานการกรองกรณีที่มีและไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียงที่ความเข้มข้นของสายป้อนมีค่าต่างกัน

ความเข้มข้น (กรัมต่อลิตร)	กรณีไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง				กรณีที่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง			
	R_M	R_C	R_p	R_T ($R_M+R_C+R_p$)	R_M	R_C	R_p	R_T ($R_M+R_C+R_p$)
5	8.58	553.06	-0.08	561.55	8.53	290.42	1.19	300.14
10	13.49	567.75	-0.97	580.27	9.73	466.26	0.95	476.94
20	13.19	682.83	0.31	696.33	12.80	466.98	3.78	483.56

หน่วย: $\times 10^8$ (1/เซนติเมตร)

(สภาวะของการทดลอง: ความเร็วสายป้อน 0.06 เมตรต่อวินาที, ความดันคร่อมเยื่อแผ่น 0.22 บาร์, ความเร็วรอบในการหมุน 0 รอบต่อนาที, ความเข้มของคลื่นเหนือเสียง 1.76 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร)

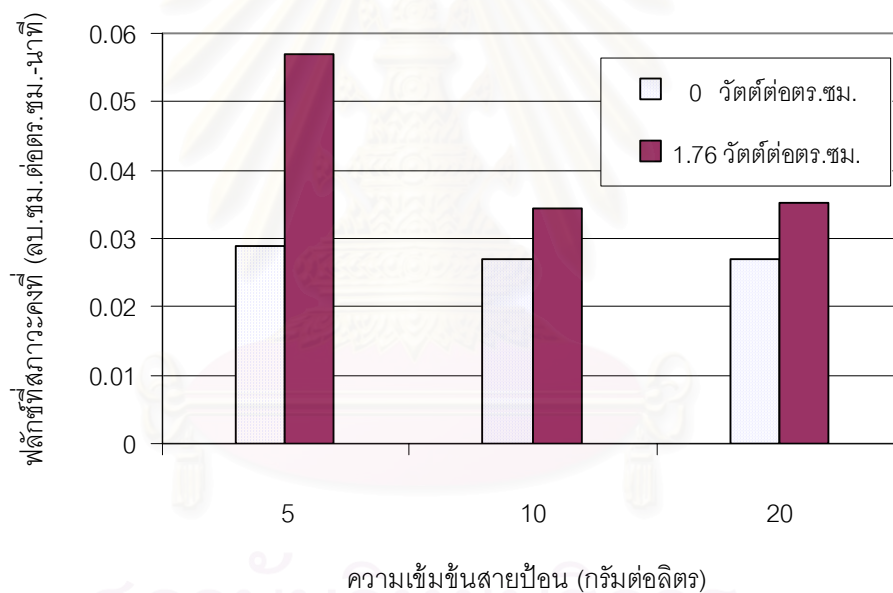
- กรณีใช้คลื่นเหนือเสียง

- เมื่อไม่มีการหมุนเยื่อแผ่น

กรณีเมื่อทำการเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของสารละลายยีสต์ 5, 10 และ 20 กรัมต่อ ลิตร ที่ความเร็วสายป้อน 0.06 เมตรต่อวินาที ความดันคร่อมเยื่อแผ่น 0.22 บาร์ ความเร็วรอบ 0 รอบต่อนาที ความเข้มของคลื่นเหนือเสียง 1.76 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ผลการทดลองแสดงดัง รูปที่ 6.18 พบว่าคลื่นเหนือเสียงจะสามารถเพิ่มค่าฟลักซ์การกรองได้ที่ทุกความเข้มข้น โดยเมื่อ ความเข้มข้นของสารละลายยีสต์เท่ากับ 5, 10 และ 20 กรัมต่อลิตร ฟลักซ์การกรองจะเพิ่มขึ้นจาก เมื่อไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง 2, 1.25 และ 1.29 เท่า ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาผลการวัดเพอ มิเอทฟลักซ์ที่เวลาต่างๆ ดังรูปที่ 6.19 พบว่าคลื่นเหนือเสียงสามารถเพิ่มฟลักซ์การกรองที่สภาวะ ความเข้มข้นของสารละลายยีสต์ 5 กรัมต่อลิตรได้ดีกว่าที่ความเข้มข้น 10 และ 20 กรัมต่อลิตร

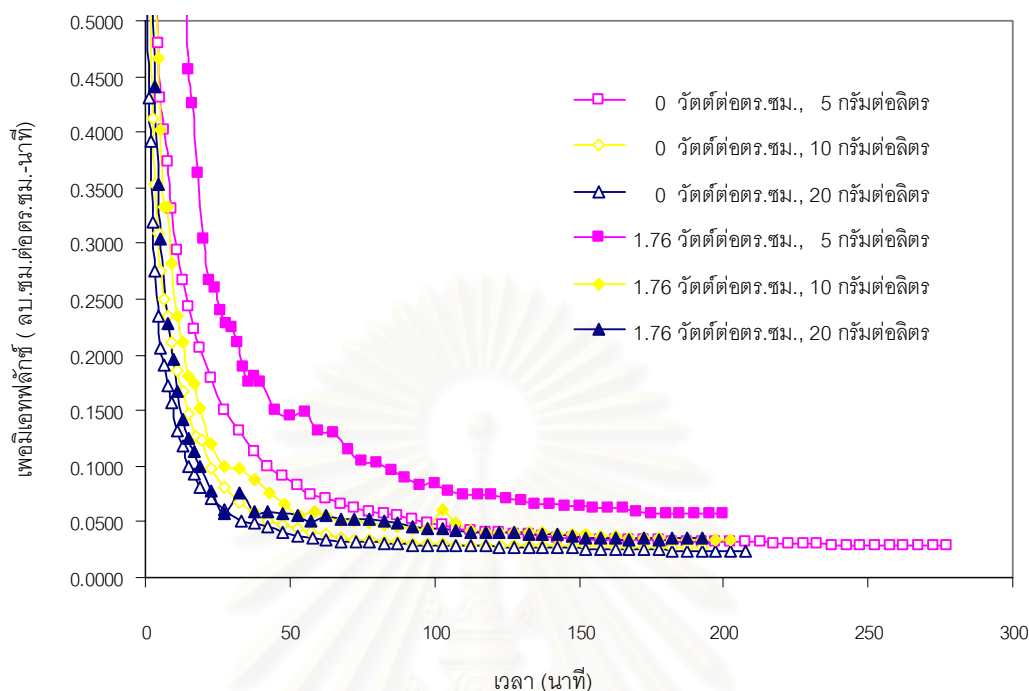
ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อคลื่นเหนือเสียงเดินทางผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นของอนุภาคสูง จะเกิดการสะท้อนและหักเหของคลื่นเสียงมาก จึงส่งผลให้แอมพลิจูดของคลื่นที่ตกกระทบบนชั้น เค้กมีค่าลดลง

เมื่อการกรองเข้าใกล้สภาวะคงที่ คลื่นเหนือเสียงมีผลในการเพิ่มฟลักซ์การกรองที่ ความเข้มข้น 10 และ 20 กรัมต่อลิตรได้เท่ากัน เนื่องจากที่ได้อธิบายในรูปที่ 6.4 ซึ่งได้ทำการ ทดลองกับดินเหนียวโดยการทาบนผิวเยื่อแผ่นด้วยความหนาที่ต่างกัน สรุปได้ว่าที่ความเข้มข้น ของสารละลายยีสต์มากซึ่งทำให้เค้กมีความหนามากขึ้นนั้นก็สามารถทำให้ชั้นเค้กหลุดออกได้มาก เช่นเดียวกับกรณีที่มีกความหนาของชั้นเค้กน้อย ดังนั้นที่ความเข้มข้นของสารละลายยีสต์ 20 กรัม ต่อลิตร คลื่นเหนือเสียงจึงส่งผลให้ฟลักซ์การกรองสามารถเพิ่มขึ้นได้เท่ากับสภาวะที่ความเข้มข้น สารละลายยีสต์ 10 กรัมต่อลิตร



รูปที่ 6.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสายป้อนและค่าฟลักซ์ที่สภาวะคงที่ กรณีไม่มีการหมุนเยื่อแผ่น เมื่อไม่ใช้คลื่นเหนือเสียงและใช้คลื่นเหนือเสียงที่ 1.76 วัตต์ ต่อตารางเซนติเมตร

(ความเร็วสายป้อน 0.06 เมตรต่อวินาที, ความดันคร่อมเยื่อแผ่น 0.22 บาร์, ความเร็ว รอบในการหมุน 0 รอบต่อนาที)



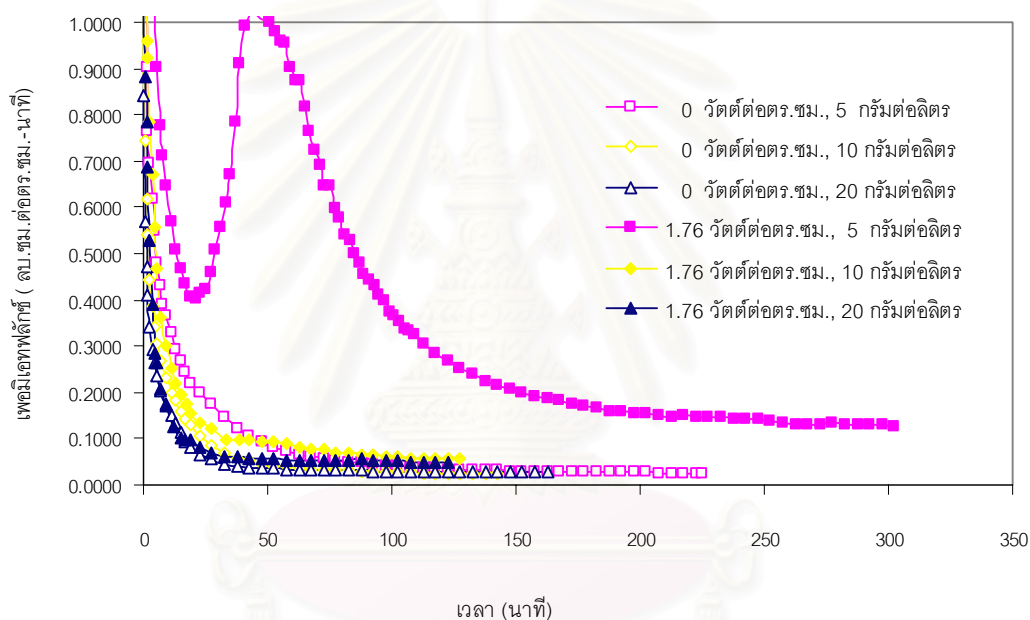
รูปที่ 6.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอมีเอทฟลักซ์และเวลา กรณีไม่มีการหมุนเยื่อแผ่น เมื่อไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียงและใช้คลื่นเหนือเสียงที่ 1.76 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และที่ความเข้มข้นของสารละลายยีสต์ 5, 10 และ 20 กรัมต่อลิตร (ความเร็วสายป้อน 0.06 เมตรต่อวินาที, ความดันคร่อมเยื่อแผ่น 0.22 บาร์, ความเร็วรอบในการหมุน 0 รอบต่อนาที)

เมื่อพิจารณาค่าความต้านทานการกรอง ดังตารางที่ 6.4 พบว่าค่าความต้านทานการกรองรวม (R_T) กรณีที่มีการใช้คลื่นเหนือเสียงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นมากขึ้น นั่นคือคลื่นเหนือเสียงสามารถลดค่าความต้านทานเนื่องจากอนุภาคที่สะสมบนผิวของเยื่อแผ่นที่ความเข้มข้นน้อยได้ดีกว่า แต่ที่ความเข้มข้นของสารละลายยีสต์ 10 และ 20 กรัมต่อลิตร คลื่นเหนือเสียงส่งผลในการลดการสะสมของอนุภาคบนผิวของเยื่อแผ่นได้เท่ากัน เนื่องจากเหตุผลที่ได้กล่าวมาแล้ว

- เมื่อมีการหมุนเยื่อแผ่น

กรณีทำการเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของสารละลายยีสต์ที่ 5, 10 และ 20 กรัมต่อลิตร ที่ความเร็วสายป้อน 0.06 เมตรต่อวินาที ความดันคร่อมเยื่อแผ่น 0.22 บาร์ ความเร็วรอบในการหมุน 20 รอบต่อนาที ความเข้มของคลื่นเหนือเสียง 1.76 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 6.20 พบว่าคลื่นเหนือเสียงสามารถเพิ่มฟลักซ์การกรองที่ความเข้มข้น 5 กรัม

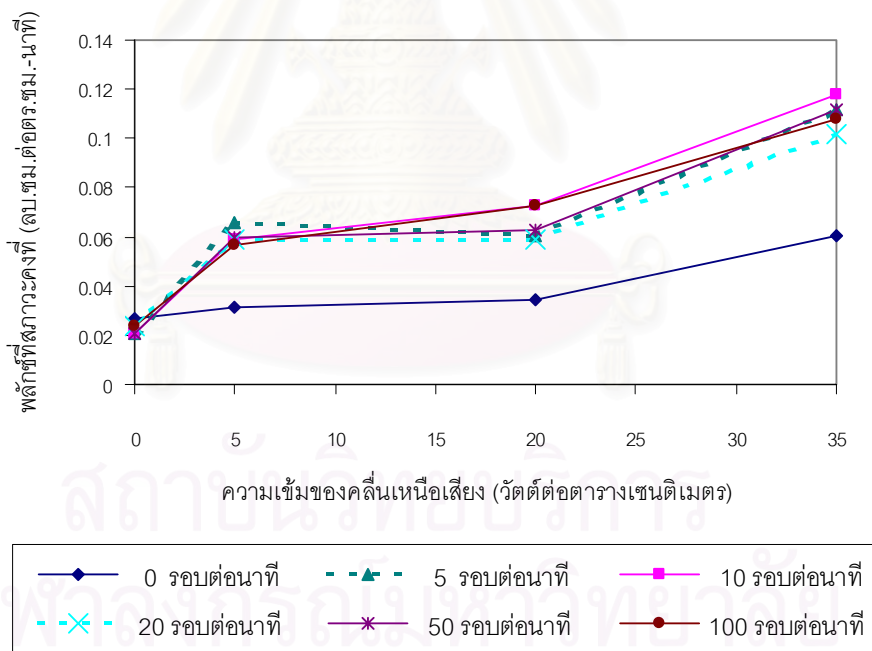
ต่อลิตร ได้ดีกว่าที่ 10 และ 20 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ เนื่องจากเหตุผลที่ได้กล่าวมาแล้ว คือ ที่ความเข้มข้นของสารละลายยีสต์มากจะเกิดการสะท้อนและหักเหของคลื่นมากเป็นผลให้แอมพลิจูดที่ส่งไปยังเซ็นเซอร์มีน้อยลง แต่จะสังเกตได้ว่าที่ความเข้มข้น 5 กรัมต่อลิตร จะเกิดปรากฏการณ์ในการหลุดของเค็กบนผิวของเยื่อแผ่นแบบทั้งแผ่น ดังที่อธิบายในรูปที่ 6.3 โดยเมื่อทำการทดลองไปประมาณ 20 นาที ที่สภาวะความเข้มข้นของสายป้อน 5 กรัมต่อลิตร ฟลักซ์การกรองจะเริ่มเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว นั่นคืออนุภาคที่สะสมบนผิวเยื่อแผ่นหลุดออกเป็นแผ่นทำให้ฟลักซ์การกรองเพิ่มขึ้นโดยใช้เวลาประมาณ 30 นาทีจึงถึงจุดสูงสุด ซึ่งฟลักซ์การกรองตรงจุดนี้เพิ่มขึ้นจากตำแหน่งเวลาก่อนที่เค็กจะหลุดถึง 2.5 เท่า และจะลดลงเรื่อยๆจนเข้าสู่สภาวะคงที่ที่ประมาณ 300 นาที



รูปที่ 6.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเพอมีเอทฟลักซ์และเวลา กรณีมีการหมักเยื่อแผ่น เมื่อไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียงและมีการใช้คลื่นเหนือเสียง ที่ความเข้มข้นของคลื่นเหนือเสียง 1.76 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ความเข้มข้นสารละลายยีสต์ 5, 10 และ 20 กรัมต่อลิตร (ความเร็วสายป้อน 0.06 เมตรต่อวินาที, ความดันคร่อมเยื่อแผ่น 0.22 บาร์, ความเร็วรอบ 20 รอบต่อนาที)

6.1.3 ความเข้มของคลื่นเหนือเสียง

กรณีเมื่อทำการเปลี่ยนค่าความเข้มของคลื่นเหนือเสียง 0.44, 1.76 และ 3.09 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ความเร็วสายป้อน 0.06 เมตรต่อวินาที ความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร ความดันคร่อมเยื่อแผ่น 0.22 บาร์ และความเร็วรอบในการหมุนเยื่อแผ่น 0, 5, 10, 20, 50 และ 100 รอบต่อนาที ผลการทดลองแสดงดังรูป 6.21 พบว่าทั้งกรณีที่ไม่มีการหมุนและมีการหมุนของเยื่อแผ่นคลื่นเหนือเสียงสามารถเพิ่มฟลักซ์การกรองได้ คือ ในกรณีที่ไม่มีการหมุนของเยื่อแผ่น ที่ความเข้มของคลื่นเหนือเสียง 0.44, 1.76 และ 3.09 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ฟลักซ์การกรองเพิ่มขึ้นคิดเป็น 1.3, 1.7 และ 2.3 เท่า ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง สำหรับในกรณีที่มีการหมุนของเยื่อแผ่นที่ความเร็วรอบเท่ากับ 5, 10, 20, 50 และ 100 รอบต่อ นาที พบว่าที่ความเข้มของคลื่นเหนือเสียง เท่ากับ 0.44, 1.76 และ 3.09 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ฟลักซ์การกรองจะเพิ่มขึ้นเฉลี่ยประมาณ 2.8, 3 และ 5 เท่า ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับเมื่อไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียงที่ความเร็วรอบเท่ากัน



รูปที่ 6.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของคลื่นเหนือเสียงและค่าฟลักซ์ที่สภาวะคงที่ เมื่อความเร็วรอบในการหมุนต่างกัน คือ 0, 5, 10, 20, 50 และ 100 รอบต่อนาที (ความเร็วสายป้อน 0.06 เมตรต่อวินาที, ความเข้มข้นสารละลายยีสต์ 10 กรัมต่อลิตร, ความดันคร่อมเยื่อแผ่น 0.22 บาร์)

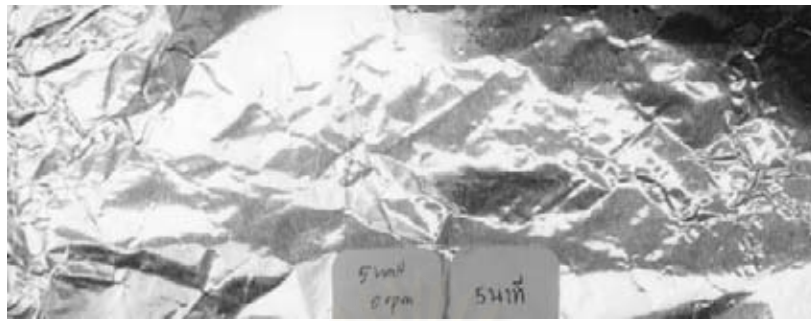
จากผลการทดลองจะเห็นได้ชัดว่า ในกรณีที่ไม่มีภาระของเยื่อแผ่น คลื่นเหนือเสียงสามารถเพิ่มพลังการกรองได้ เนื่องมาจากการเพิ่มความเข้มของคลื่นเหนือเสียงหรือการเพิ่มแอมพลิจูดของคลื่น (P_A) จะส่งผลให้ค่าความดันที่ได้จากการยุบตัวของคาวิตีเทชันมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ดังสมการ 4.3 และ 4.9 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของบงกช [1] ตามที่กล่าวถึงมาแล้ว อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าเมื่อความเข้มของคลื่นเหนือเสียงเพิ่มขึ้นจาก 0.44 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เป็น 1.76 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร พลังการกรองเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย สามารถอธิบายได้ว่า สาเหตุหนึ่งเนื่องจากค่าของความเข้มของคลื่นเหนือเสียงที่วัดได้เป็นค่ากำลังอินพุท (Input) ที่ป้อนให้แก่ตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง ซึ่งโดยทั่วไปคุณลักษณะ (Characteristic) ของตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงคือ ค่าเอาพุท (Output) จะมีลักษณะแบบไม่เป็นเชิงเส้นตรงกับค่าอินพุท (Input) ดังนั้นค่าอินพุท (Input) นี้จึงไม่สามารถบ่งบอกถึงปริมาณมากน้อยเชิงตัวเลขกับค่าเอาพุท (Output) ที่เกิดขึ้นจริงได้ นอกจากนั้นกลไกในการกำจัดอนุภาคของคลื่นเหนือเสียง เกิดจากปัจจัยหลายอย่างดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งปัจจัยต่างๆเหล่านั้นขึ้นกับค่าความเข้มของคลื่นเหนือเสียงที่สัดส่วนที่ต่างกัน

นอกจากนั้นได้ทำการศึกษาผลของความเข้มของคลื่นเหนือเสียงที่มีต่อการเกิดคาวิตีเทชัน เพื่อใช้ในการอธิบายการกำจัดอนุภาคบนผิวเยื่อแผ่นเมื่อมีการใช้คลื่นเหนือเสียงที่มีความเข้มของคลื่นเหนือเสียงต่างๆ การทดลองแบ่งเป็น 3 การทดลอง ผลการทดลองแสดงดังนี้

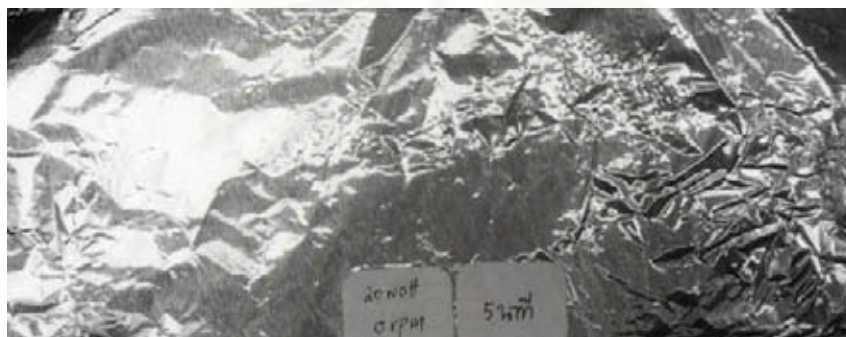
1) การเจาะทะลุบนอลูมิเนียมพอยล์

ผลของความเข้มของคลื่นเหนือเสียงที่มีผลต่อปริมาณและความรุนแรงในการเกิดคาวิตีเทชันบนผิวเยื่อแผ่น สังเกตได้จากปริมาณและบริเวณของรูที่เกิดบนอลูมิเนียมพอยล์ โดยทำการทดลองขณะไม่หมุนเยื่อแผ่น และเปิดคลื่นเหนือเสียงที่ความเข้ม 0.44, 1.76 และ 3.09 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 6.22 (ก), (ข) และ (ค)

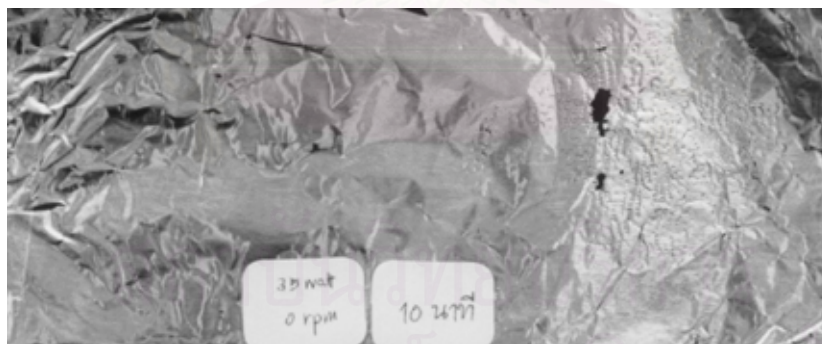
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 6.22 การใช้ลูมิเนียมฟอยล์ทดสอบความเข้มและบริเวณที่คลื่นเหนือเสียงเคลื่อนที่ผ่าน เมื่อไม่มีการหมุนของเยื่อแผ่น เป็นเวลา 10 นาที ที่ความเข้มของคลื่นเหนือเสียงต่างกัน
 (ก) 0.44 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (ข) 1.76 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร
 (ค) 3.09 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

จากการทดลองพบว่าเมื่อส่งผ่านคลื่นเหนือเสียงไปบนอลูมิเนียมฟอยล์ที่ความเข้มของคลื่นเหนือเสียงมากจะเกิดรูเป็นปริมาณที่มากกว่าที่ความเข้มของคลื่นเหนือเสียงน้อย เนื่องจากการเพิ่มความเข้มของคลื่นเหนือเสียงจะทำให้ความรุนแรงในการเกิดคาวิตีชันมีมากขึ้น แต่เมื่อสังเกตที่ 0.44 และ 1.76 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร พบว่าเกิดรูบริเวณอลูมิเนียมฟอยล์เป็นปริมาณที่น้อยมากจนแทบจะไม่มี ในขณะที่ความเข้มของคลื่นเหนือเสียง 3.09 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร สามารถทำให้อลูมิเนียมฟอยล์ขาดได้เป็นบริเวณกว้าง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ความเข้มของคลื่นเหนือเสียง 0.44 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตรสามารถเพิ่มฟลักซ์การกรองได้ใกล้เคียงกับที่ 1.76 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และที่ความเข้มของคลื่นเหนือเสียง 3.09 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตรสามารถเพิ่มฟลักซ์การกรองได้สูงกว่ามากเนื่องจากเหตุผลดังที่ได้กล่าวมาแล้ว คือ ความไม่เป็นเชิงเส้นของค่าอินพุท (Input) และเอาต์พุท (Output) ของตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง จึงทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่อ่านได้จากออสซิลโลสโคป ณ ตำแหน่งขาเข้าตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงอาจมีค่ามากกว่าค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงส่งออกไป

2) การเรืองแสงด้วยสารเคมี

ผลของความเข้มของคลื่นเหนือเสียงที่มีต่อปริมาณและความรุนแรงในการเกิดคาวิตีชันสังเกตได้จากบริเวณและความเข้มของการเรืองแสงที่เกิดขึ้นในสารละลายลูมินอล โดยทำการทดลองขณะไม่หมุนเยื่อแผ่น และเปิดคลื่นเหนือเสียงที่ความเข้ม 0.44, 1.76 และ 3.09 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 6.23 (ก), (ข), (ค) และ (ง) [เป็นภาพถ่ายด้านข้างของการส่งคลื่นเหนือเสียงมายังเยื่อแผ่น ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 6.23 (ก)] พบว่าที่ความเข้มของคลื่นเหนือเสียงเพิ่มมากขึ้น จะทำให้เกิดการเรืองแสงสีฟ้าเป็นบริเวณกว้างและเข้มกว่าที่ความเข้มของคลื่นเหนือเสียงน้อย โดยเฉพาะที่ความเข้มของคลื่นเหนือเสียงน้อยคือ 0.44 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร จะไม่เห็นแสงสีฟ้าเลย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก)



(ข)

- รูปที่ 6.23 ภาพถ่ายแสดงการเรืองแสงของสารเคมี (Chemiluminescence) เนื่องจากคลีนเหนื่อเสียงกรณี่ที่ไม่มีการหมุนของเยื่อแผ่น ที่ความเข้มของคลีนเหนื่อเสียงต่างกัน
- (ก) ภาพถ่ายขณะไม่มีการเรืองแสง (ข) 0.44 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร
 (ค) 1.76 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (ง) 3.09 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร



(ค)



(ง)

รูปที่ 6.23(ต่อ)ภาพถ่ายแสดงการเรืองแสงของสารเคมี (Chemiluminescence) เนื่องจากคลิ่นเหนือเสียงกรณีนีที่ไม่มีกรหมุนของเยื่อแผ่น ที่ความเข้มของคลิ่นเหนือเสียงต่างกัน

(ก) ภาพถ่ายขณะไม่มีกรเรืองแสง (ข) 0.44 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

(ค) 1.76 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (ง) 3.09 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

3) การกำจัดอนุภาคดินเหนียว

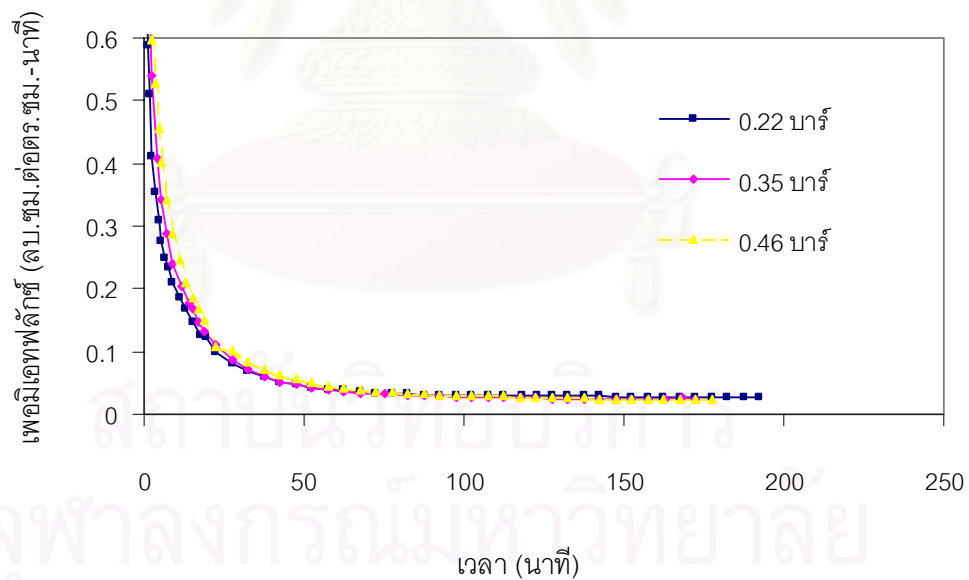
ผลการกำจัดอนุภาคดินเหนียวที่ติดบนผิวของเยื่อแผ่นที่ความเข้มข้นของคลีนเนื้อเสียง 0.44, 1.76 และ 3.09 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 6.13, 6.14, 6.15 และ 6.16 พบว่าที่ความเข้มข้นของคลีนเนื้อเสียงเพิ่มขึ้นจะสามารถกำจัดดินเหนียวได้เป็นบริเวณกว้างขึ้นและเร็วขึ้น

จากการทดลองทั้ง 3 ส่วน สรุปได้ว่าการเพิ่มความเข้มข้นของคลีนเนื้อเสียงเป็นการเพิ่มความรุนแรงในการเกิดคาวิเทชัน ดังนั้นกรณีที่มีความเข้มข้นของคลีนเนื้อเสียงมากพลักซ์การกรองสามารถเพิ่มขึ้นได้มากกว่ากรณีที่ความเข้มข้นของคลีนเนื้อเสียงน้อย แต่ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคลีนเนื้อเสียงกับค่าพลักซ์การกรองที่ได้นี้ไม่เป็นเชิงเส้นกัน เนื่องจากดังที่กล่าวมาแล้วว่าค่าของความเข้มข้นของคลีนเนื้อเสียงที่วัดได้เป็นค่ากำลังอินพุท (Input) ที่ป้อนให้แก่ตัวกำเนิดคลีนเนื้อเสียง ซึ่งโดยทั่วไปคุณลักษณะ (Characteristic) ของตัวกำเนิดคลีนเนื้อเสียง คือ ค่าเอาพุท (Output) จะมีลักษณะแบบไม่เป็นเชิงเส้นตรงกับค่าอินพุท (Input) ดังนั้นค่าอินพุท (Input) นี้จึงไม่สามารถบ่งบอกถึงปริมาณมากน้อยเชิงตัวเลขกับค่าเอาพุท (Output) ที่เกิดขึ้นจริงได้ นอกจากนี้ในสภาวะการกรองจริงที่ความเข้มข้นของคลีนเนื้อเสียงต่างกันอาจส่งผลให้ชั้นเค้กมีความหนาอย่างน้อยต่างกัน ดังนั้นผลของความเข้มข้นของคลีนเนื้อเสียงต่อการกำจัดอนุภาคบนผิวเยื่อแผ่นจึงอาจมีปัจจัยของความหนาของชั้นเค้กวมอยู่ด้วย

6.1.4 ความดันคร่อมเยื่อแผ่น

- กรณีไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง

กรณีเมื่อเปลี่ยนค่าความดันคร่อมเยื่อแผ่น 0.22, 0.35 และ 0.46 บาร์ ที่ความเร็วสายป้อน 0.06 เมตรต่อวินาที ความเข้มข้นของสารละลายยีสต์ 10 กรัมต่อลิตร และไม่หมุนเยื่อแผ่น ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 6.24 พบว่าเมื่อไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียงค่าฟลักซ์การกรองที่สภาวะคงที่ที่ทุกความดันคร่อมเยื่อแผ่นมีค่าใกล้เคียงกัน คือ ประมาณ 0.027 ลบ.ซม.ต่อตร.ซม.-นาที่ แสดงว่าค่าฟลักซ์การกรองที่สภาวะคงที่ไม่ขึ้นกับความดันคร่อมเยื่อแผ่น (ในช่วงที่ทำการทดลอง) แต่ทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่เร็วขึ้นเมื่อความดันคร่อมเยื่อแผ่นมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อพิจารณาค่าฟลักซ์การกรองจากสมการที่ 3.2 ค่าฟลักซ์การกรองจะแปรผันตรงกับความดัน ดังนั้นในการทดลองเมื่อความดันคร่อมเยื่อแผ่นเพิ่มขึ้นค่าฟลักซ์การกรองจะเพิ่มขึ้นด้วย แต่เมื่อการกรองเข้าใกล้สภาวะคงที่ ที่ความดันคร่อมเยื่อแผ่นมากก็จะทำให้อุณหภูมิที่สะสมอยู่บนผิวเยื่อแผ่นอัดตัวกันแน่นขึ้น จะเห็นได้จากที่ความต้านทานการกรองเนื่องจากการสะสมของอนุภาคบนผิวเยื่อแผ่นเพิ่มขึ้น ดังตารางที่ 6.5 จึงส่งผลตรงข้ามกันคือทำให้ค่าฟลักซ์การกรองลดลง



รูปที่ 6.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอมีเอทฟลักซ์และเวลาในกรณีที่ไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง ที่ความดันคร่อมเยื่อแผ่น 0.22, 0.35, 0.46 บาร์ ตามลำดับ (ความเร็วสายป้อน 0.06 เมตรต่อวินาที, ความเข้มข้นของสารละลายยีสต์ 10 กรัมต่อลิตร, ความเร็วรอบในการหมุน 0 รอบต่อนาที)

ตารางที่ 6.5 แสดงค่าความต้านทานการกรองกรณีที่มีและไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง ที่ความดันคร่อมเยื่อแผ่นต่างกัน

ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	ความดันคร่อม เยื่อแผ่น (บาร์)	0 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร				1.76 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร			
		R_M	R_C	R_p	R_T	R_M	R_C	R_p	R_T
0	0.22	13.49	620.50	-0.97	633.02	9.73	486.70	0.95	497.38
	0.35	11.49	1094.60	1.70	1107.79	10.90	590.02	1.14	602.06
	0.44	12.47	1503.53	0.63	1516.62	12.91	744.31	1.09	758.31
5	0.22	13.39	710.46	1.49	725.34	14.27	259.80	6.70	280.78
	0.35	9.65	978.61	0.84	989.10	10.11	334.30	1.78	346.19
	0.44	13.38	1442.77	-0.19	1455.96	13.00	390.64	0.79	404.43

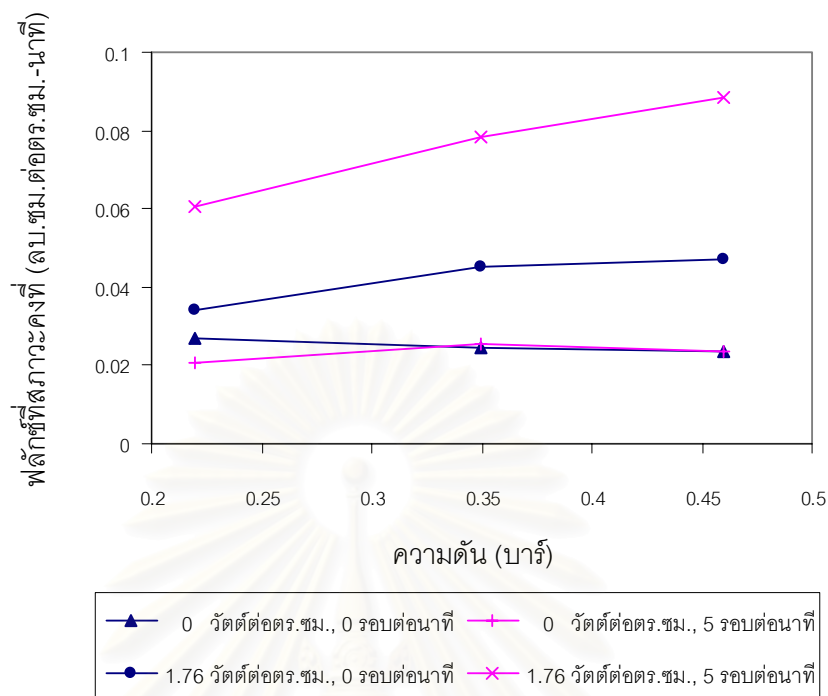
หน่วย: $\times 10^8$ (1/เซนติเมตร)

(สภาวะของการทดลอง: ความเร็วสายป้อน 0.06 เมตรต่อวินาที, ความเข้มข้นของสารละลายยีสต์ 10 กรัมต่อลิตร)

- กรณีมีการใช้คลื่นเหนือเสียง

-เมื่อไม่มีการหมุนเยื่อแผ่น

กรณีเมื่อเปลี่ยนค่าความดันคร่อมเยื่อแผ่น 0.22, 0.35 และ 0.46 บาร์ ที่ความเร็วสายป้อน 0.06 เมตรต่อวินาที ความเข้มข้นของสารละลายยีสต์ 10 กรัมต่อลิตร ความเข้มของคลื่นเหนือเสียง 1.76 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และไม่มีการหมุนของเยื่อแผ่น ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 6.24 พบว่าที่ความดันคร่อมเยื่อแผ่น 0.22, 0.35 และ 0.46 บาร์ ค่าฟลักซ์การกรองที่สภาวะคงที่เมื่อมีการใช้คลื่นเหนือเสียงจะมีค่าสูงกว่าค่าฟลักซ์การกรองที่ได้จากกรณีไม่ใช้คลื่นเหนือเสียง 1.27, 1.84 และ 2 เท่า ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าฟลักซ์การกรองที่สภาวะคงที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความดันคร่อมเยื่อแผ่นแต่เมื่อเพิ่มความดันขึ้นไปอีกฟลักซ์การกรองก็ไม่สูงขึ้น ทั้งนี้ต้องพิจารณาทั้งทฤษฎีการกรองและทฤษฎีคลื่นเหนือเสียง ในการเพิ่มความดันคร่อมเยื่อแผ่นหรือเป็นการเพิ่มความดันของระบบนั้น จะส่งผลให้ค่าความเข้มของคลื่นเหนือเสียงต่ำสุดที่ต้องการในการเกิดคาวิเทชัน (Cavitation Threshold) มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นการเกิดคาวิเทชันที่ความดันคร่อมเยื่อแผ่นสูงขึ้นจะยากขึ้น ในทางตรงข้ามจากสมการ 4.2 และ 4.3 จะเห็นว่า การเพิ่มความดันของระบบ (ค่า P_h ในสมการ) จะทำให้คาวิเทชันที่เกิดขึ้นนี้ยุบตัวได้รวดเร็วขึ้นและมีความรุนแรงมากขึ้น ดังนั้นผลของการเปลี่ยนแปลงความดันคร่อมเยื่อแผ่นต่อและความรุนแรงของคาวิเทชันที่เกิดการยุบตัวขึ้น มีผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงฟลักซ์การกรองในทิศทางตรงข้าม



รูปที่ 6.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันคร่อมเยื่อแผ่นและค่าฟลักซ์ที่สภาวะคงที่เมื่อใช้และไม่ใช้คลื่นเหนือเสียงที่ 1.76 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตรในกรณีที่มีไม่มีการหมุนและมีการหมุนที่ 5 รอบต่อนาที (ความเร็วสายป้อน 0.06 เมตรต่อวินาที, ความเข้มข้นสารละลายยีสต์ 10 กรัมต่อลิตร)

แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มความดันคร่อมเยื่อแผ่นมากขึ้น ก็จะทำให้อนุภาคที่สะสมบนผิวเยื่อแผ่นอัดตัวกันแน่นขึ้น ทำให้ค่าความต้านทานการกรองเนื่องจากการสะสมบนผิวเยื่อแผ่น มีค่ามากขึ้นซึ่งส่งผลตรงข้ามกัน คือทำให้ฟลักซ์การกรองลดลง

-เมื่อมีการหมุนเยื่อแผ่น

กรณีเมื่อเปลี่ยนค่าความดันคร่อมเยื่อแผ่น 0.22, 0.35 และ 0.46 บาร์ ที่ความเร็วสายป้อน 0.06 เมตรต่อวินาที ความเข้มข้นของสารละลายยีสต์ 10 กรัมต่อลิตร ความเข้มของคลื่นเหนือเสียง 1.76 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และ ความเร็วรอบในการหมุน 5 รอบต่อนาที ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 6.25 พบว่าที่ความดันคร่อมเยื่อแผ่น 0.22, 0.35 และ 0.46 บาร์ ค่าฟลักซ์การกรองที่ได้เมื่อมีการใช้คลื่นเหนือเสียงเพิ่มขึ้นคิดเป็น 2.9, 3.1 และ 3.75 เท่า ตามลำดับ ซึ่งต้องพิจารณาทั้งทฤษฎีการกรองและทฤษฎีคลื่นเหนือเสียงดังได้กล่าวมาแล้วคือ การเพิ่มความดันคร่อมเยื่อแผ่นเป็นผลให้อนุภาคอัดตัวกันแน่นขึ้น ในขณะที่เดียวกันก็มีผลต่อค่าความเข้มของคลื่นเหนือเสียงต่ำสุดที่ทำให้เกิดคาวิตชันและความรุนแรงของการยุบตัวของคาวิตชัน

6.1.5 ความสามารถในการเก็บกักของเยื่อแผ่น

ค่าความสามารถในการเก็บกักของเยื่อแผ่นคำนวณได้จากสมการ 3.4 และ 3.5 ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 6.6 พบว่าน้ำที่ได้จากการกรองสารละลายยีสต์ผ่านเยื่อแผ่นมีความเข้มข้นของสารละลายยีสต์น้อยมาก ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์รีเจคชันประมาณ 99% แสดงให้เห็นว่าการใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมกับการกรองแม่ในขณะที่มีความเข้มข้นของคลื่นเหนือเสียงสูงสุดที่ใช้ในการทดลองคือ 3.09 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตรไม่ทำให้ความสามารถในการเก็บกักของเยื่อแผ่นลดลงตลอดการทดลอง ซึ่งเมื่อพิจารณาจากขนาดของอนุภาคยีสต์มีการกระจายขนาดตั้งแต่ 1.8 – 10 ไมโครเมตร และ ขนาดรูพรุนเฉลี่ยประมาณ 2 ไมโครเมตร ประกอบกับการกรองเป็นการกรองแบบมีชั้นเค้ก (Cake Filtration) ดังนั้นจึงเป็นการยากที่เซลล์ยีสต์จะสามารถผ่านเยื่อแผ่นไปยังด้านเพอมีเอทได้

ตารางที่ 6.6 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์รีเจคชันที่เวลาต่างๆ เมื่อมีการใช้และไม่ใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมกับการกรอง ที่ความเข้มข้นของคลื่นเหนือเสียงต่างกัน

นาที่ที่	ความเข้มข้นของคลื่นเหนือเสียง (วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร)			
	0	0.44	1.76	3.09
3	99.807	99.572	99.723	99.773
10	99.664	99.589	99.732	99.757
30	99.639	99.564	99.723	99.757
50	99.631	99.622	99.723	99.790
70	99.690	99.589	99.740	99.782
90	99.664	99.673	99.740	99.815
110	99.715	99.706	99.773	99.790

6.2 ผลของคลื่นเหนือเสียงต่อเยื่อแผ่น

การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของเยื่อแผ่นที่เปลี่ยนแปลงไปสามารถวิเคราะห์ได้จาก การวัดขนาดรูพรุนและความพรุนของเยื่อแผ่น ถ้าเยื่อแผ่นถูกทำลายมากก็จะมีขนาดรูพรุนหรือ ความพรุนมาก แต่การวัดขนาดรูพรุนด้วยปรอทอาจจะไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ได้อย่างชัดเจน เนื่องจากการทำลายโดยคลื่นเหนือเสียงอาจจะมีน้อยมากประกอบกับเยื่อแผ่นแต่ละอันก็มีขนาดรู พุนที่ไม่เท่ากัน นอกจากนี้สามารถวิเคราะห์ได้จากการดูลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ผลการทดลองทั้ง 2 วิธี แสดงดังนี้

- ก. ผลการวัดขนาดรูพรุนและความพรุนด้วยเครื่องวัดขนาดรูพรุนด้วยปรอท ดังแสดงในภาค ผนวก ง สรุปได้ดังตารางที่ 6.7

ตารางที่ 6.7 แสดงค่าขนาดรูพรุนเฉลี่ยและความพรุนของเยื่อแผ่นเมื่อทำการกรองที่สภาวะต่างๆ

สภาวะการกรองที่นำขึ้นตัวอย่างเยื่อแผ่นไปวิเคราะห์		ชื่อตัวอย่าง	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (ไมโครเมตร)	ความพรุน (%)
ความเข้มของคลื่นเหนือเสียง (วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร)	ความเร็วรอบในการหมุน (รอบต่อนาที)			
0	0	Sample 1	2.76	40.77
0.44	0	Sample 6	2.20	62.14
1.76	0	Sample 5	0.08	61.65
1.76	20	10 (outside)	2.39	52.70
3.09	0	Sample 3	2.33	63.88
3.09*	0	Sample 4	2.30	58.47

หมายเหตุ: ใช้ขึ้นตัวอย่างด้านที่คลื่นเหนือเสียงตกกระทบตลอดเวลา

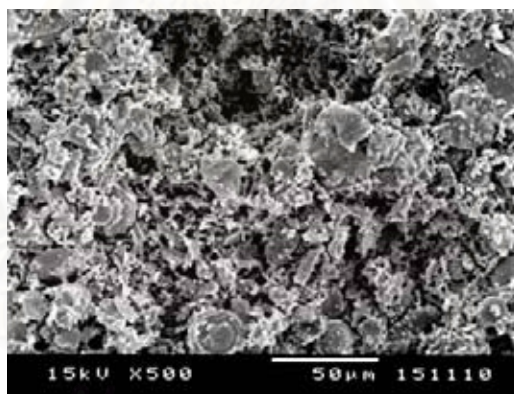
* ขึ้นตัวอย่างที่นำไปวิเคราะห์คือขึ้นตัวอย่างด้านที่อยู่ตรงข้ามกับตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ผลการวิเคราะห์ขนาดรูพรุนและความพรุนของเยื่อแผ่นที่ผ่านการกรองและใช้คลื่นเหนือเสียงกรณีไม่หมุนเยื่อแผ่น พบว่าการใช้คลื่นเหนือเสียงจะทำให้ขนาดรูพรุนมีค่าใกล้เคียงกับกรณีไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง คือ ประมาณ 2-3 ไมโครเมตร แต่การใช้คลื่นเหนือเสียงทำให้เยื่อแผ่นมีความพรุนมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเมื่อไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง และสำหรับขึ้นตัวอย่างเยื่อ

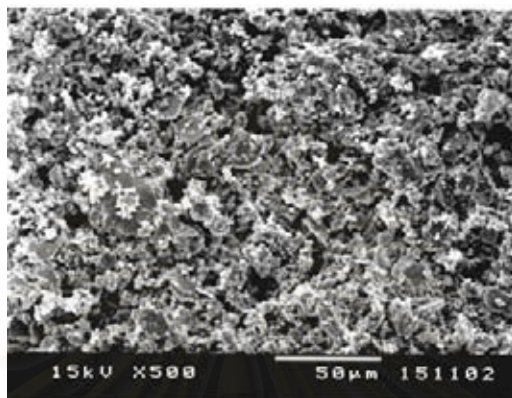
แผ่นด้านที่อยู่ด้านตรงข้ามกับตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงก็มีค่าความพรุนเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันแต่น้อยกว่าด้านที่สัมผัสกับคลื่นเหนือเสียงโดยตรง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าในกรณีที่ไม่มีการหมุนของเยื่อแผ่นคลื่นเหนือเสียงสามารถทำให้ความพรุนของเยื่อแผ่นมีค่ามากขึ้นโดยเฉพาะด้านที่สัมผัสกับคลื่นเหนือเสียงโดยตรง

สำหรับกรณีที่มีการหมุนเยื่อแผ่น ผลของคลื่นเหนือเสียงสามารถทำลายเยื่อแผ่นได้น้อยลงเมื่อสังเกตจากค่าความพรุน แสดงให้เห็นว่าการที่เยื่อแผ่นหมุนโดยไม่ได้สัมผัสกับคลื่นเหนือเสียงตลอดเวลา จะสามารถลดการทำลายของเยื่อแผ่นลงได้

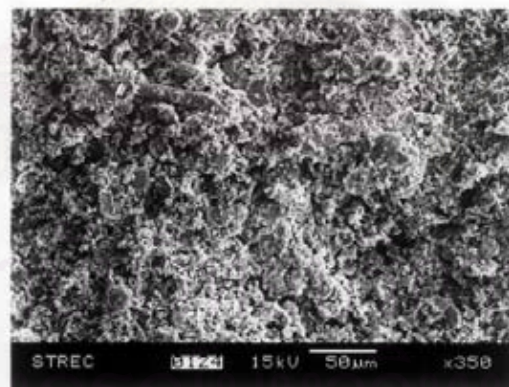
- ข. ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ซึ่งแสดงผิวหน้าของเยื่อแผ่นที่ผ่านการกรองที่สภาวะต่างๆ จะเห็นลักษณะของผิวหน้าของเยื่อแผ่นที่ไม่ผ่านคลื่นเหนือเสียงและเยื่อแผ่นที่ถูกทำลายด้วยคลื่นเหนือเสียงจนเกิดเป็นรู ดังรูปที่ 6.26-6.32



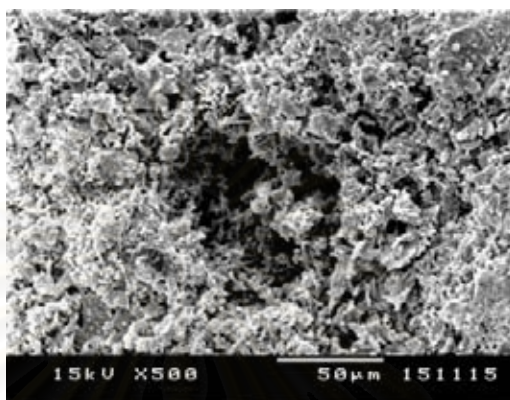
รูปที่ 6.26 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงผิวหน้าของเยื่อแผ่นที่ผ่านการกรองกรณีที่ไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง



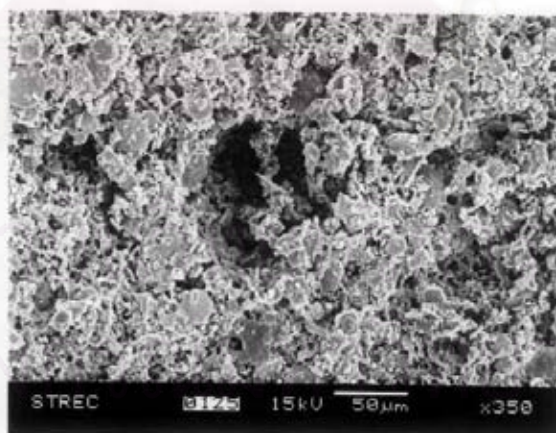
รูปที่ 6.27 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงผิวหน้าของเยื่อแผ่นที่ผ่านการกรองร่วมกับการใช้คลื่นเหนือเสียงที่ 0.44 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และไม่หมุนเยื่อแผ่น



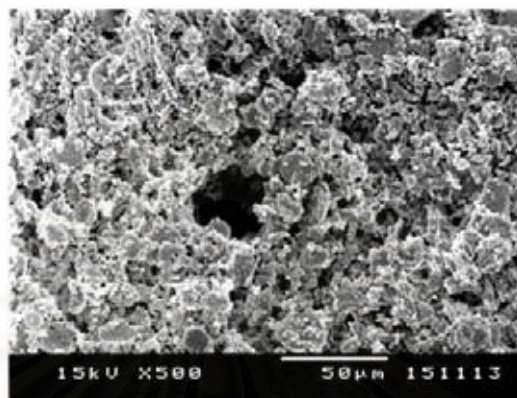
รูปที่ 6.28 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงผิวหน้าของเยื่อแผ่นที่ผ่านการกรองร่วมกับการใช้คลื่นเหนือเสียงที่ 0.44 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และหมุนเยื่อแผ่นที่ 5 รอบต่อนาที



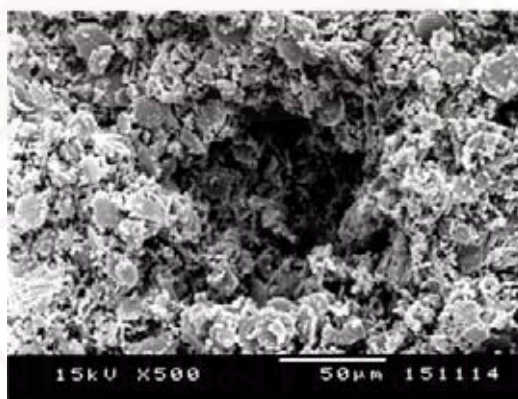
รูปที่ 6.29 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงผิวหน้าของเยื่อแผ่นที่ผ่านการกรองร่วมกับการใช้คลื่นเหนือเสียงที่ 1.76 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และไม่หมุนเยื่อแผ่น



รูปที่ 6.30 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงผิวหน้าของเยื่อแผ่นที่ผ่านการกรองร่วมกับการใช้คลื่นเหนือเสียงที่ 1.76 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และหมุนเยื่อแผ่นที่ 20 รอบต่อนาที



รูปที่ 6.31 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงผิวหน้าของเยื่อแผ่นที่ผ่านการกรองร่วมกับการใช้คลื่นเหนือเสียงที่ 3.09 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และไม่หมุนเยื่อแผ่น



รูปที่ 6.32 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงผิวหน้าของเยื่อแผ่นที่ผ่านการกรองร่วมกับการใช้คลื่นเหนือเสียงที่ 3.09 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และหมุนเยื่อแผ่นที่ 20 รอบต่อนาที

6.3 ผลของคลื่นเหนือเสียงต่อยีสต์

คลื่นเหนือเสียงอาจมีผลต่อยีสต์ในลักษณะที่ทำให้เซลล์แตก เปลี่ยนแปลงรูปร่าง หรือสูญเสียคุณสมบัติในการเจริญเติบโต จึงได้ทำการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาค เนื่องจากการแตกของเซลล์มีผลทำให้การกระจายขนาดของอนุภาคเปลี่ยนแปลงไปในทางที่อนุภาคมีขนาดเล็กลง นอกจากนี้ได้ศึกษาจากการส่องดูลักษณะทางกายภาพของเซลล์ยีสต์จากกล้องจุลทรรศน์เพื่อดูรูปร่างที่เปลี่ยนแปลงไปและลักษณะของผนังเซลล์หรือของเหลวภายในเซลล์ ส่วนคุณสมบัติในการเจริญเติบโตได้มีการศึกษามาแล้ว [1,11] พบว่าคลื่นเหนือเสียงที่ความเข้มของคลื่นเหนือเสียงไม่เกิน 3.5 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตรไม่มีผลต่อคุณสมบัติในการเจริญเติบโตของยีสต์ สำหรับผลการกระจายขนาดของอนุภาคยีสต์และลักษณะทางกายภาพ แสดงดังนี้

ก. ผลการศึกษาการกระจายขนาดของอนุภาคยีสต์ แสดงดังนี้

1. สารละลายยีสต์ที่ผ่านการกรองปกติโดยไม่ใช้คลื่นเหนือเสียงโดยดึงตัวอย่างเมื่อเวลาผ่านไป 0, 30, 60, 90 และ 120 นาที (ข้อมูลการทดลองแสดงในภาคผนวก จ Sample ID : 157_0, 157_30, 157_60 และ 157_90 ตามลำดับ)
2. สารละลายยีสต์ที่ผ่านการกรองร่วมกับการใช้คลื่นเหนือเสียงที่ 35 วัตต์ โดยดึงตัวอย่างเมื่อเวลาผ่านไป 0, 30, 60, 90 และ 120 นาที (ข้อมูลการทดลองแสดงในภาคผนวก จ Sample ID : 1, 2, 3, 4, 5 ตามลำดับ)
3. สารละลายยีสต์ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ที่ผ่านคลื่นเหนือเสียงจากอัลตราโซนิคโพรบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 เซนติเมตร ที่ความเข้มของคลื่นเหนือเสียง 30 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยไม่มีการควบคุมอุณหภูมิ เป็นระยะเวลา 5 และ 15 นาที (ข้อมูลการทดลองแสดงในภาคผนวก จ Sample ID : probe_5, probe_15 ตามลำดับ)
4. สารละลายยีสต์ที่ผ่านการปั่นกวนโดยเครื่องวอร์เทกซ์เป็นเวลา 3, 6, 10 และ 20 นาที (ข้อมูลการทดลองแสดงในภาคผนวก จ Sample ID : v3, v6, v10, v20 ตามลำดับ)

กรณีไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียงในการกรอง

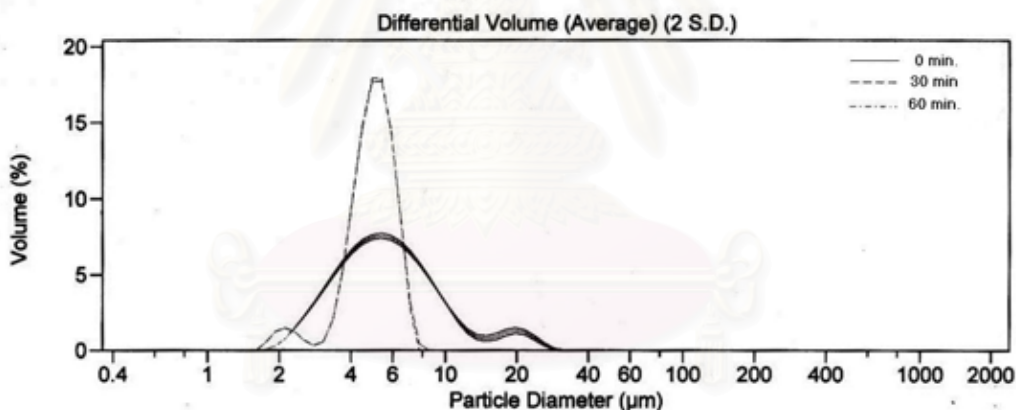
ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคยีสต์ที่ผ่านการกรองกรณีไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง พบว่าตัวอย่างยีสต์จากถังป้อนที่เวลาเริ่มต้น 0 นาที มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 6.3 ไมโครเมตร แต่จะมีอนุภาคส่วนใหญ่ขนาด 4.8 ไมโครเมตร และมีการกระจายขนาดค่อนข้างกว้างเนื่องจากอนุภาคยีสต์มีการรวมกลุ่มกันไม่แยกเป็นอนุภาคเดี่ยวๆ สำหรับผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคของตัวอย่างยีสต์ที่เก็บ ณ เวลา 30, 60, 90 และ 120 นาที พบว่ายีสต์มี

ขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 4.8 ไมโครเมตร และมีการกระจายขนาดที่แคบลง ทั้งนี้เนื่องจากสารละลายยีสต์ที่การผ่านการกรองและผ่านปั๊มจะทำให้อนุภาคที่เกาะกลุ่มกันแยกออกเป็นอนุภาคเดี่ยวๆมากขึ้น

กรณีใช้คลื่นเหนือเสียงในการกรอง

ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคยีสต์ที่ผ่านการกรองร่วมกับการใช้คลื่นเหนือเสียงที่ความเข้มของคลื่นเหนือเสียง 3.09 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร พบว่ายีสต์มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 4.8 ไมโครเมตร และ ลักษณะการกระจายขนาดที่เวลาต่างๆใกล้เคียงกับกรณีไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง

เมื่อสังเกตกราฟการกระจายขนาดของอนุภาคยีสต์ที่เก็บตัวอย่าง ณ เวลาตั้งแต่เวลาที่ 30 ทั้งกรณีที่ไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียงและมีการใช้คลื่นเหนือเสียง จะเห็นว่ามีอนุภาคบางส่วนที่มีขนาดอยู่ระหว่าง 1.5-2.5 ไมโครเมตร และเมื่อนำกราฟการกระจายขนาดของอนุภาคยีสต์ ณ เวลาเริ่มต้นมาซ้อนทับกับการกระจายขนาดของอนุภาคยีสต์ ณ เวลา 30 นาที และ 60 นาที ดังรูปที่ 6.33



รูปที่ 6.33 กราฟการกระจายขนาดของอนุภาคยีสต์เมื่อเก็บตัวอย่างจากถังป้อน ณ เวลา 0, 30 และ 60 นาที กรณีมีการกรองร่วมกับการใช้คลื่นเหนือเสียง

จากกราฟจะเห็นว่าอนุภาคขนาดเล็กที่เกิดขึ้นเกิดจากการแตกตัวของกลุ่มของอนุภาคใหญ่ มีจำนวนลดลงโดยไม่ได้เกิดจากอนุภาคยีสต์ขนาดเล็กเพิ่มขึ้นเพียงอย่างเดียว ดังนั้นอนุภาคที่มีขนาด 1.5-2.5 ไมโครเมตรน่าจะเป็นเซลล์ยีสต์ปกติที่มีขนาดเล็ก โดยไม่มีการแตกของเซลล์ยีสต์

อย่างไรก็ตามเพื่อยืนยันว่ายีสต์ไม่ได้เกิดการแตกจึงนำสารละลายยีสต์ที่ผ่านการปั่นกวนด้วยเครื่องวอร์เทกซ์ที่เวลาต่างๆ (การปั่นกวนด้วยเครื่องวอร์เทกซ์จะไม่ทำให้เซลล์ยีสต์แตก) มาทำการวัดการกระจายขนาดของอนุภาค พบว่ายีสต์เกิดการแยกเป็นอนุภาคเดี่ยวๆมากขึ้น โดยมีการ

กระจายขนาดตั้งแต่ 1.5-20 ไมโครเมตร จึงยืนยันได้ว่ายีสต์ที่นำมาใช้ในการกรองมีขนาดตั้งแต่ 1.5 ไมโครเมตรขึ้นไป ดังนั้นในการทดลองอนุภาคเล็กๆที่เกิดขึ้นไม่ได้เกิดจากการแตกของเซลล์ และเมื่อสังเกตจากกล้องจุลทรรศน์ดังรูปที่ 6.34 ก็พบว่ามียีสต์ที่มีขนาดเล็กประมาณ 1.5-2.5 ไมโครเมตรรวมอยู่ด้วย

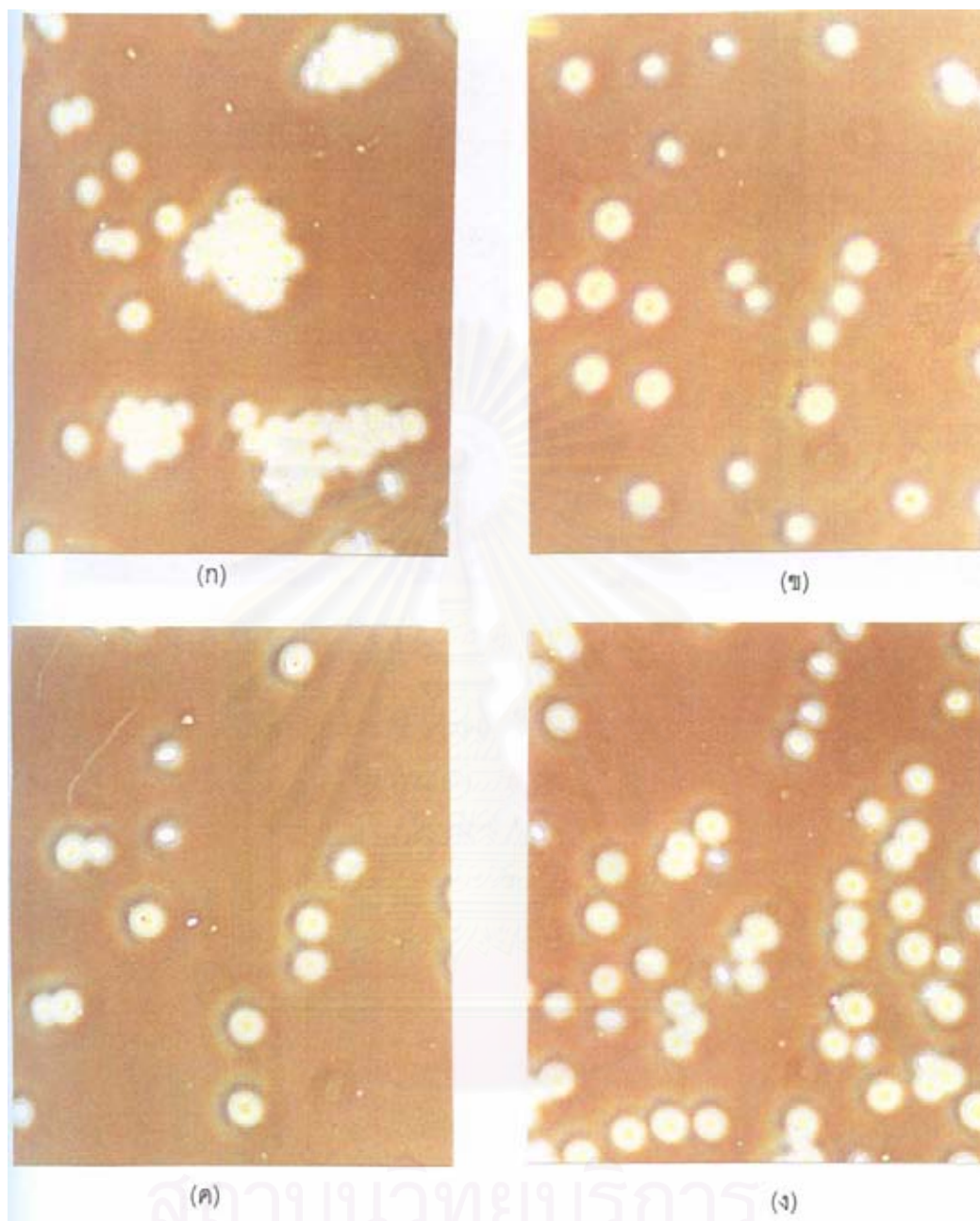
กรณีใช้อัลตราโซนิกโพรบ

ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคสำหรับสารละลายยีสต์ที่ผ่านคลื่นเหนือเสียง โดยใช้อัลตราโซนิกโพรบที่ความเข้มของคลื่นเหนือเสียง 30 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร พบว่า สารละลายยีสต์ที่ผ่านคลื่นเหนือเสียงเป็นเวลา 5 นาที จะมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4.7 ไมโครเมตร ส่วนสารละลายยีสต์ที่ผ่านคลื่นเหนือเสียงเป็นเวลา 15 นาที จะมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4.0 ไมโครเมตร ทั้งนี้เนื่องจากการใช้คลื่นเหนือเสียงที่ความเข้มสูงมีผลต่ออนุภาคยีสต์ โดยสามารถทำให้เซลล์แตกได้ซึ่งสังเกตได้ชัดจากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์

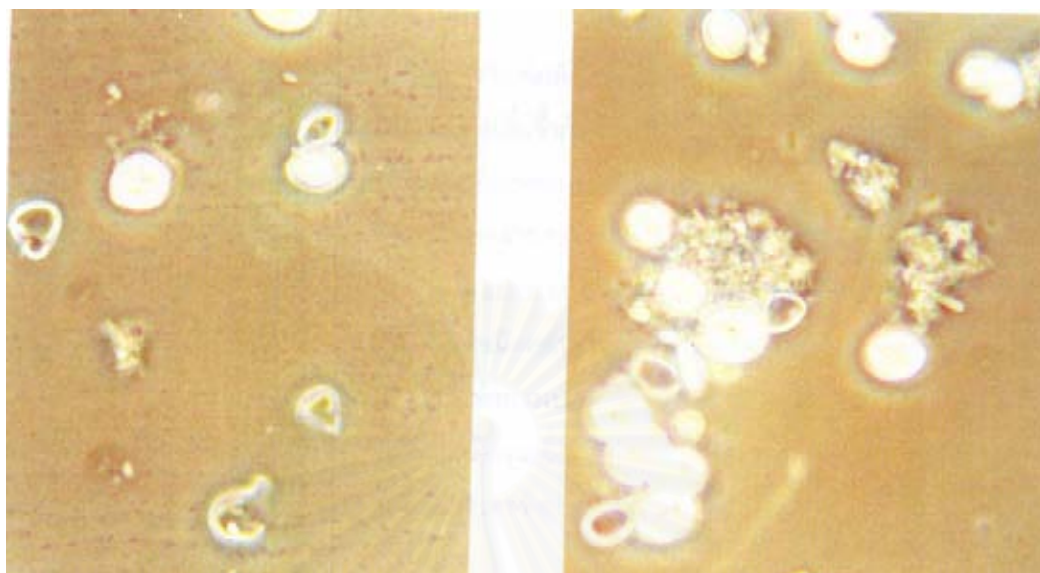
ข. ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพ

ลักษณะทางกายภาพของยีสต์เมื่อส่องจากกล้องจุลทรรศน์ของตัวอย่างที่เก็บ ณ เวลา 0, 30, 60 และ 90 นาที ตามลำดับ กรณีเมื่อทำการกรองโดยใช้คลื่นเหนือเสียงที่ความเข้มของคลื่นเหนือเสียง 3.09 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 6.34 จะสังเกตเห็นว่าตัวอย่างยีสต์ที่เก็บ ณ เวลาเริ่มต้น เซลล์ยีสต์มีการรวมเป็นกลุ่มก้อนใหญ่ๆ หลายๆ กลุ่ม ส่วนตัวอย่างยีสต์ที่เก็บ ณ เวลา 30, 60 และ 90 นาที ลักษณะของเซลล์ยีสต์ยังคงมีลักษณะกลมและรี และแยกเป็นอนุภาคเดี่ยวๆ ทั้งนี้เนื่องจากการผ่านปั๊มจะทำให้เซลล์ยีสต์ซึ่งเกาะกลุ่มกันแยกเป็นอนุภาคเดี่ยว นอกจากนี้จะสังเกตเห็นว่ามีเซลล์ยีสต์ที่มีขนาดเล็กกว่าตัวอื่นๆ ประมาณ 2 เท่า อยู่บางส่วน ซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดการกระจายขนาดของอนุภาค

ลักษณะทางกายภาพของยีสต์เมื่อส่องจากกล้องจุลทรรศน์ของสารละลายยีสต์ที่ผ่านคลื่นเหนือเสียงจากอัลตราโซนิกโพรบที่ความเข้มของคลื่นเหนือเสียง 30 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตรเป็นเวลา 5 นาที จะสังเกตเห็นว่ายีสต์บางตัวมีผนังเซลล์แตก ส่วนสารละลายยีสต์ที่ผ่านคลื่นเหนือเสียงจากอัลตราโซนิกโพรบที่ความเข้มของคลื่นเหนือเสียงเท่ากันเป็นเวลา 15 นาที จะสังเกตเห็นว่าเซลล์ยีสต์ส่วนใหญ่เกิดการแตกและของเหลวภายในเซลล์ไหลออกมานอกเซลล์ ดังรูปที่ 6.35



รูปที่ 6.34 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 400 ของยีสต์ที่เก็บตัวอย่างจากถังป้อน
 ๓ เวลาต่างๆ เมื่อทำการกรองและใช้คลื่นเหนือเสียงที่ความเข้ม 3.09 วัตต์ต่อตาราง
 เซนติเมตร
 (ก) 0 นาที (ข) 30 นาที (ค) 60 นาที (ง) 90 นาที



(ก)

(ข)

รูปที่ 6.35 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 1000 เท่า ของยีสต์เมื่อทำการผ่านคลื่น
 เหนื่อเสียงจากอัลตราโซนิคโพรบที่ความเข้มของคลื่นเหนื่อเสียง 30 วัตต์ต่อตาราง
 เซนติเมตร เป็นระยะเวลาต่างกัน

(ก) 5 นาที

(ข) 15 นาที

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.4 วิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

การนำคลื่นเหนือเสียงมาประยุกต์ใช้ในการเพิ่มอัตราการกรองนั้น พบว่าการใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมกับการหมุนสามารถทำให้อัตราการกรองเพิ่มขึ้นได้ถึง 5 เท่าในสภาวะที่เหมาะสมเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียงซึ่งหมายความว่าจะสามารถลดต้นทุนการปฏิบัติการต่อหน่วยที่ผลิตได้ถึง 5 เท่า หรืออีกนัยหนึ่งเราสามารถเพิ่มรายได้จากการผลิตที่เพิ่มขึ้นซึ่งขึ้นอยู่กับว่าจุดประสงค์ของการกรองเป็นแบบใด แต่อย่างไรก็ตามการใช้คลื่นเหนือเสียงช่วยในการกรองต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมในการติดตั้งตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง จึงต้องใช้ระยะเวลาหนึ่งจึงจะคุ้มทุนดังที่จะแสดงการคำนวณต่อไป โดยทำการเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง และ กรณีที่มีการใช้คลื่นเหนือเสียงและไม่หมุนเยื่อแผ่น (โดยกรณีหลังจะนำข้อมูลจากงานวิจัยของบงกช [1] ซึ่งให้ฟลักซ์การกรองเพิ่มขึ้น 3 เท่าที่สภาวะเหมาะสม)

การคำนวณความคุ้มค่าทุนในกรณีการลดต้นทุนค่าปฏิบัติการ

จากอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ สามารถคำนวณค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติการและต้นทุนการผลิตของการกรองในกรณีที่ไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียงและมีการใช้คลื่นเหนือเสียงทั้งแบบหมุนและไม่หมุนเยื่อแผ่นได้ โดยกำหนดให้ปริมาณผลิตภัณฑ์มีค่าเท่ากันในทุกกรณี ดังตารางที่ 6.8

จากการคำนวณพบว่า ในกรณีการกรองร่วมกับการใช้คลื่นเหนือเสียงและไม่หมุนเยื่อแผ่นจะมีค่าใช้จ่ายในการสร้างและติดตั้งอุปกรณ์ในการกำเนิดคลื่นเหนือเสียงเพิ่มขึ้นมาเป็นจำนวน 15,740 บาท แต่สามารถลดต้นทุนค่าปฏิบัติการได้เนื่องจากใช้เวลาในการผลิตน้อยลงถึง 3 เท่าสังเกตได้จากค่าไฟฟ้า ซึ่งถึงแม้จะมีค่าไฟฟ้าเพิ่มเติมคือจากการใช้ตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง ค่าไฟฟ้ายรวมก็ยังมีค่าน้อยกว่ากรณีไม่ใช้คลื่นเหนือเสียง (นั่นคือ $0.6t < 1.4t$) ส่วนกรณีการกรองร่วมกับการใช้คลื่นเหนือเสียงและหมุนเยื่อแผ่น นอกจากจะมีค่าใช้จ่ายในการสร้างและติดตั้งตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงแล้วยังมีค่ามอเตอร์และอุปกรณ์ช่วยในการหมุน รวมทั้งสิ้น 16,740 บาท แต่สามารถลดเวลาในการผลิตลงถึง 5 เท่า ทำให้ค่าไฟฟ้ามียกน้อยกว่าทุกกรณี (นั่นคือ $0.352t < 0.6t < 1.4t$) โดย t คือระยะเวลาในการกรอง

ตารางที่ 6.8 แสดงค่าใช้จ่ายทั้งหมดของการลงทุนในกรณีที่ไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง และมีการใช้คลื่นเหนือเสียงทั้งแบบไม่หมุนและหมุนเยื่อแผ่น

รายการค่าใช้จ่าย	การลงทุนในกรณีที่ไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง	การลงทุนในกรณีที่มีการใช้คลื่นเหนือเสียงและไม่หมุนเยื่อแผ่น	การลงทุนในกรณีที่มีการใช้คลื่นเหนือเสียงและหมุนเยื่อแผ่น
1. ต้นทุนการสร้างและติดตั้งอุปกรณ์ (Capital Cost)			
1. ระบบการกรองทั้งหมด	15,000	15,000	15,000
- เครื่องกรองพร้อมอุปกรณ์ในการติดตั้ง			
- ระบบท่อและวาล์ว			
2. อุปกรณ์ในการกำเนิดคลื่นเหนือเสียง	-		
- ตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง 2 ตัว		5,600	5,600
- อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้า		7,800	7,800
3. ค่าติดตั้งตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง (5% ของค่าอุปกรณ์)	-	670	670
4. ค่าบำรุงรักษา (5% ของอุปกรณ์)	-	670	670
5. เม็ดเคลือบ	-	1,000	1,000
6. มอเตอร์และอุปกรณ์ช่วยในการหมุน	-	-	1,000
รวมทั้งสิ้น	15,000	30,740	31,740
2. ต้นทุนค่าปฏิบัติการ (Operating Cost)			
1. ค่าไฟฟ้า			
- มีมน้ำ	0.37 กิโลวัตต์×1 ตัว×4×t	0.37 กิโลวัตต์×1 ตัว×4× t/3	0.37 กิโลวัตต์×1 ตัว×4× t/5
- ตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง	-	0.04 กิโลวัตต์×2 ตัว×4× t/3	0.35 กิโลวัตต์×2 ตัว×4× t/5
- มอเตอร์	-	-	น้อยมาก
2. ค่าสารตั้งต้น	10×t	10×t	10×t
รวมทั้งสิ้น	0.37×4X t + 10X t	(0.37+0.04×2)× 4X t/3 + 10X t	(0.37+0.035×2)× 4X t/5 + 10X t
ต้นทุนรวม	15,000+0.37×4x t + 10x t =15,000 + 1.48t + 10t	30,740 + (0.37+0.04×2)× 4x t/3+ 10x t =30,740 + 0.6t + 10t	31,740 + (0.37+0.035×2)× 4x t/5 + 10x t =31,740 + 0.352t + 10t

- หมายเหตุ: - ค่าไฟฟ้า 4 บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง
- ในกรณีที่มีการหมุนของเยื่อแผ่นจะใช้ตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง 2 ตัวมาคำนวณ เนื่องจากเป็นการเปรียบเทียบที่พื้นที่ในการกรองที่เท่ากัน
 - สำหรับค่าใช้จ่ายในการควบคุมอุณหภูมิภายในถังป้อนของกรณีที่มีการใช้คลื่นเหนือเสียงไม่จำเป็นต้องมีเพิ่มเติม เนื่องจากอุณหภูมิในระบบเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกัน ทั้งกรณีที่มีการใช้คลื่นเหนือเสียงและไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง ดังแสดงในภาคผนวก ฉ

โดยมีการคำนวณจุดคุ้มทุนของการใช้การใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมกับการกรองทั้งแบบหมุนและไม่หมุนเยื่อแผ่น แสดงดังตารางที่ 6.9

ตารางที่ 6.9 เปรียบเทียบจุดคุ้มทุนของการใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมกับการกรองแบบไม่หมุนและหมุนเยื่อแผ่น

จุดคุ้มทุน	ไม่ใช้คลื่นเหนือเสียง	ใช้คลื่นเหนือเสียงและไม่หมุนเยื่อแผ่น	ใช้คลื่นเหนือเสียงและหมุนเยื่อแผ่น
ระยะเวลา (ชั่วโมง)	13,392	1,130	603
ระยะเวลา (วัน) ถ้าปฏิบัติการวันละ 10 ชั่วโมง	1,340	113	60
จำนวนหน่วยที่ผลิต (ลิตร)	2,410	610	542

หมายเหตุ: การคำนวณจุดคุ้มทุนแสดงในภาคผนวก ข

จากการเปรียบเทียบจุดคุ้มทุนของการกรองกรณีไม่ใช้คลื่นเหนือเสียงและใช้คลื่นเหนือเสียง ดังแสดงในตารางที่ 6.9 พบว่า การกรองกรณีไม่ใช้คลื่นเหนือเสียง มีระยะเวลาในการคุ้มทุน 13,392 ชั่วโมง หรือ 1,340 วัน และในการติดตั้งตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงเพียงอย่างเดียวโดยไม่มี การหมุนมีระยะเวลาในการดำเนินการ 1,130 ชั่วโมง หรือ 113 วัน สำหรับความคุ้มค่าในการลงทุน และเมื่อพิจารณาการใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมกับการหมุนเยื่อแผ่นระยะเวลาดังกล่าวจะลดลง เป็น 600 ชั่วโมง หรือประมาณ 60 วัน หรือประมาณ 20 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีแรก ซึ่งพบว่าการใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมกับการหมุนเยื่อแผ่นคุ้มต่อการลงทุนมากกว่า สำหรับข้อจำกัดของการใช้คลื่นเหนือเสียงพร้อมกับการหมุนคือใช้ได้เฉพาะการกรองในโมดูลแบบท่อเท่านั้น และต้องทำการติดตั้งโมดูลใหม่เพื่อให้สามารถหมุนได้

นอกจากนี้การใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมกับการกรองที่ความเข้มสูงเป็นระยะเวลานาน อาจทำให้อายุการใช้งานของเยื่อแผ่นน้อยลง ขึ้นอยู่กับความเข้มของคลื่นเหนือเสียงที่ใช้และระยะเวลาในการปฏิบัติการ แต่เนื่องจากในช่วงเวลาและความเข้มของคลื่นเหนือเสียงที่ใช้ในการทำวิจัยนี้ไม่สามารถสังเกตเห็นผลของคลื่นเหนือเสียงที่มีต่อเยื่อแผ่นจึงไม่สามารถกำหนดจำนวนครั้งในการเปลี่ยนเยื่อแผ่นต่อปีได้ กรณีศึกษาต่อไปจะนำค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนเยื่อแผ่นมาร่วมพิจารณา คือ

กรณีศึกษาค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนเยื่อแผ่น ในระยะเวลา 1 ปี (3,650 ชั่วโมง)

กำหนดให้: เยื่อแผ่นราคาอันละ 400 บาท และ การใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมกับการหมุนสามารถเพิ่มอัตราการกรองได้มากกว่ากรณีไม่ใช้คลื่นเหนือเสียง 5 เท่า

ตารางที่ 6.10 แสดงค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมในการเปลี่ยนเยื่อแผ่น

กรณีที่ 1 : ทำการกรองโดยไม่ใช้คลื่นเหนือเสียง

ค่าใช้จ่าย	จำนวนครั้งในการเปลี่ยนเยื่อแผ่นต่อปี
	0
ต้นทุนการผลิต (บาท)	15,000
ต้นทุนค่าปฏิบัติการ (บาท)	63,510
ต้นทุนรวม (บาท)	78,510
กำลังการผลิต (ลิตรต่อชั่วโมง)	0.18
ต้นทุนต่อหน่วยผลิต (บาท/ลิตร)	120

กรณีที่ 2 : ทำการกรองร่วมกับการใช้คลื่นเหนือเสียงและมีการหมุนเยื่อแผ่น

ค่าใช้จ่าย	จำนวนครั้งในการเปลี่ยนเยื่อแผ่นต่อปี					
	0	5	10	15	20	25
ต้นทุนการผลิต (บาท)	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000
(ค่าอุปกรณ์เพิ่มเติมเมื่อใช้คลื่นเหนือเสียง+ค่าเปลี่ยนเยื่อแผ่น)	(16,740)	(18,740)	(20,740)	(22,740)	(24,740)	(26,740)
ต้นทุนค่าปฏิบัติการ (บาท)	37,785	37,785	37,785	37,785	37,785	37,785
ต้นทุนรวม (บาท)	69,525	71,525	73,525	75,525	77,525	79,525
กำลังการผลิต (ลิตรต่อชั่วโมง)	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
ต้นทุนต่อหน่วยผลิต (บาท/ลิตร)	21.16	21.77	22.38	22.99	23.60	24.21

จากการคำนวณค่าใช้จ่ายที่รวมค่าเปลี่ยนเยื่อแผ่นแล้วพบว่าการใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมกับการหมุนเยื่อแผ่นยังคงสามารถลดค่าใช้จ่ายทั้งหมดลงได้มากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนเยื่อแผ่นที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย นั่นคือ ในระยะเวลา 1 ปี ถึงแม้จะมีการเปลี่ยนเยื่อแผ่น (400 บาทต่อเยื่อแผ่น) มากถึง 25 ครั้งต่อปีหรือเฉลี่ย 2 ครั้งต่อเดือน ต้นทุนต่อหน่วยผลิตของกรณี ที่ 2 ก็ยังคงมีค่าต่ำกว่าต้นทุนต่อหน่วยผลิตของกรณี ที่ 1 มาก

อย่างไรก็ตาม จากการคำนวณข้างต้นพบว่าในการกรองร่วมกับการใช้คลื่นเหนือเสียงและมีการหมุนเยื่อแผ่นของงานวิจัยนี้มีความคุ้มค่าต่อการลงทุน ดังนั้นจึงสมควรต่อการศึกษาในด้าน การขยายขนาด, การพัฒนาเครื่องกรองต่อกันหลายเครื่อง หรือ การนำไปประยุกต์ใช้ในการกรอง สารประเภทอื่น เพื่อการพัฒนาในอุตสาหกรรมต่อไป



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 7

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะในการวิจัยเพิ่มเติม

7.1 สรุปผลการวิจัย

1. คลื่นเหนือเสียงทำให้เกิดปรากฏการณ์ควิเทชันในตัวกลางของเหลวซึ่งเป็นสาเหตุในการลดการสะสมของอนุภาคบนผิวเยื่อแผ่น ทำให้ค่าความต้านทานเนื่องจากอนุภาคที่สะสมบนผิวเยื่อแผ่นลดลง ฟลักซ์การกรองจึงเพิ่มขึ้น
2. กรณีไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมกับการกรอง การหมุนจะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าฟลักซ์การกรอง เนื่องจากระบบและสภาวะที่ใช้ในการทดลองเป็นช่วงที่ไม่มีการเกิดการหมุนวนของสารละลายของเทเลอร์ซึ่งจะทำให้เกิดแรงเฉือนกระทำต่ออนุภาคที่สะสมบนผิวเยื่อแผ่น ทำให้ฟลักซ์การกรองสูงขึ้นได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงสามารถยืนยันได้ว่าการเปลี่ยนแปลงค่าฟลักซ์การกรองจะเป็นผลเนื่องจากคลื่นเหนือเสียงเท่านั้น
3. กรณีมีการใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมกับการกรอง ผลของความเร็วยกเว้นในการหมุนในช่วง 5-100 รอบต่อนาที ไม่มีผลต่อฟลักซ์การกรองที่ทุกความเข้มข้นของคลื่นเหนือเสียง และการหมุนของเยื่อแผ่นเป็นการเพิ่มพื้นที่ในการกำจัดอนุภาคบนผิวเยื่อแผ่น โดยทำให้ฟลักซ์การกรองเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับมีการไม่มีการหมุนและใช้คลื่นเหนือเสียง
4. การเพิ่มความเข้มข้นของสายป้อนมีผลต่อพลังงานที่ส่งมายังชั้นเค้กซึ่งจะลดลงเนื่องจากการสะท้อนและหักเหของคลื่นเหนือเสียงจากจำนวนอนุภาคในสายป้อนซึ่งมีมากและชั้นเค้กที่มีความหนาขึ้น
5. การเพิ่มความเข้มข้นของคลื่นเหนือเสียงซึ่งเป็นการเพิ่มความรุนแรงในการเกิดการเกิดการยุบตัวของควิเทชัน มีผลทำให้ฟลักซ์การกรองเพิ่มขึ้น โดยที่ความเข้มข้นของคลื่นเหนือเสียง 0.44, 1.76 และ 3.09 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร จะให้ค่าฟลักซ์การกรองเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 2.8, 3.0 และ 5 เท่าตามลำดับ
6. ความดันคร่อมเยื่อแผ่นส่งผลต่อความรุนแรงในการเกิดควิเทชัน และการอัดตัวของเค้ก โดยการเพิ่มความดันคร่อมเยื่อแผ่นเป็นการเพิ่มความรุนแรงในการเกิดควิเทชัน ในขณะที่เดียวกันก็ส่งผลให้การอัดตัวของชั้นเค้กมีมากขึ้นด้วย

7. สำหรับความเข้มของคลื่นเหนือเสียงสูงสุดที่ใช้ในการทดลอง คือ 3.09 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ไม่มีผลกระทบต่อคุณลักษณะของยีสต์
8. สำหรับการกรองร่วมกับการใช้คลื่นเหนือเสียงแบบหมุนเยื่อแผ่น จะลดผลในการทำลายผิวหน้าของเยื่อแผ่นลงเนื่องจากคลื่นเหนือเสียงไม่ได้ตกกระทบเยื่อแผ่นบริเวณเดียวกันตลอดเวลา และในสภาวะที่ทำการทดลองพบว่าคลื่นเหนือเสียงไม่มีผลต่อค่าการเก็บกักของเยื่อแผ่น
9. ในการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ การนำคลื่นเหนือเสียงมาใช้ในการกรองร่วมกับการหมุนเยื่อแผ่นจะช่วยประหยัดเวลาในการกรองถึง 5 เท่า จึงเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติการลง และสามารถเพิ่มกำลังการผลิตได้มากกว่า 5 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับเมื่อไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง โดยมีระยะเวลาในการดำเนินการประมาณ 60 วันสำหรับความคุ้มค่าในการลงทุน หรือน้อยกว่ากรณีไม่ใช้คลื่นเหนือเสียงประมาณ 20 เท่า
10. เมื่อนำกรณีที่ต้องมีการเปลี่ยนเยื่อแผ่นเนื่องจากการใช้คลื่นเหนือเสียงมารวมกับการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ด้วย ภายในระยะเวลาดำเนินการเท่ากัน พบว่า เมื่อดำเนินการเป็นระยะเวลา 1 ปี ถึงแม้จะมีการเปลี่ยนเยื่อแผ่นมากถึง 25 ครั้งต่อปี ต้นทุนต่อหน่วยผลิตของกรณีใช้คลื่นเหนือเสียงและหมุนเยื่อแผ่นยังคงมีค่าต่ำกว่าต้นทุนต่อหน่วยผลิตของกรณีไม่ใช้คลื่นเหนือเสียงมาก
11. จากการทดลองการกรองร่วมกับคลื่นเหนือเสียงด้วยเยื่อแผ่นทอเซรามิคชนิดหมุนได้ที่ความเข้มข้นสารละลายยีสต์ 10 กรัมต่อลิตร ความเร็วสายป้อน 0.06 เมตรต่อวินาที พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าเพอมีเอทพลักซ์ที่สภาวะสูงสุดมีค่าสูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.15 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อตารางเซนติเมตร-นาที่ คิดเป็น 6 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง คือ ที่สภาวะความดัน 0.35 บาร์ ความเข้มของคลื่นเหนือเสียง 3.09 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ความเร็วรอบในการหมุน 5 รอบต่อนาที

7.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะในการทำวิจัยเพิ่มเติม

1. ในการทำการวิจัยไม่สามารถศึกษาปัจจัยบางอย่างได้เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องกรองที่ใช้ในการทดลอง คือ ระยะห่างระหว่างเยื่อแผ่นและท่อทรงกระบอกด้านนอก เนื่องจากท่อทรงกระบอกด้านนอกต้องมีขนาดใหญ่และหนาพอที่จะสามารถติดตั้ง

ตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง ดังนั้นจึงไม่สามารถศึกษาผลของระยะห่างระหว่างตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับเยื่อแผ่นได้

2. เนื่องจากข้อจำกัดของระยะห่างระหว่างเยื่อแผ่นและท่อทรงกระบอกด้านนอกมากดังได้กล่าวมาแล้วทำให้ความเร็วในสายป้อนต่ำ การศึกษาที่สภาวะความเร็วสายป้อนสูงๆจึงเป็นไปได้ยาก
3. ทำการศึกษาเพิ่มเติมในช่วงความเร็วรอบกว้างกว่านี้ เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาในช่วงความเร็วรอบ 5 -100 รอบต่อนาที ซึ่งช่วงการหมุนระหว่างนี้ไม่มีผลต่อค่าพลาซิก้าการกรอง และเพื่อให้เห็นผลของความเร็วรอบในการหมุนชัดเจนยิ่งขึ้น ควรเปลี่ยนค่าความเร็วรอบในการหมุนที่ช้าหรือเร็วกว่านี้มากๆ
4. ทำการศึกษาที่ความเข้มข้นของคลื่นเหนือเสียงมากขึ้น
5. ทำการศึกษากับเยื่อแผ่นและสารที่นำมากรองชนิดอื่น
6. ทำการศึกษาเมื่อกรองจากด้านในออกสู่ด้านนอกและหมุนเยื่อแผ่นเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ได้กับงานวิจัยนี้
7. การควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ขวดบรรจุน้ำแข็งใส่ลงในถังป้อนไม่สามารถควบคุมได้อย่างแม่นยำดังนั้นควรทำการควบคุมแบบมีถังหล่อเย็นด้านนอก (Cooling Jacket)
8. ทำการติดตั้งเครื่องวัดอัตราการไหลของของเหลว เพื่อให้การวัดอัตราการไหลมีความแม่นยำและสะดวกมากยิ่งขึ้น

รายการอ้างอิง

1. บงกช งามสม. ผลของคลื่นเหนือเสียงต่อการกรองระดับอนุภาคในโมดูลแบบท่อ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
2. Lee, M.S. and Atkinson, T. Crossflow Microfiltration for Recovery of Intracellular Products. Process Biochemistry 2(1995): 26-31.
3. Shimizu, Y, Matsushita, K. and Watanabe, A. J. Ferment. Bioeng. 78(1995): 1994-1998.
4. Kawakatsu, T., Nakao, S. and Kimura, S. J. Chemical Engineering of Japan 2(1993): 656-661.
5. Kurazuvich, J.N. and Piergiovanni, P.R. J. of Membrane Science 112(1996): 241-247.
6. Shimizu, Y., Uryu, K., Okuno, Y. and Wayanabe, A. J. of Fermentation & Bioengineering 81(1996): 5-60.
7. Murase, T., Ohn, T. and Kimata, J. J. Membrane Sci. 108(1995): 121-128.
8. Guell, C. and Davis, R. G. J. Membrane Sci. 119(1996): 269-284.
9. Kokugan, T., Kaseno, T., Fujiwara, S. and Shimizu, M. Ultrasonic Effect on Ultrafiltration Properties of Ceramic Membrane. Membrane 20(1995): 213-223.
10. Matsumoto, Y., Nakau, S. and Kimura, S. Improvement of Membrane Permeation Performance by Ultrasonic Microfiltration. J. of Chemical Engineering in Japan 4(1996): 561-567.
11. จิตติวุฒิ เพชรมณี. ผลของคลื่นเหนือเสียงต่อการกรองระดับอนุภาคในเครื่องกรองแบบแผ่น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
12. Kobayashi, T., Chai, X. and Fujii, N. Ultrasound enhanced cross-flow membrane filtration. Separation and Purification Technology 17(1999): 31-40.
13. จันทพร ปุณณรัตน์กุล. การแยกเซลล์ *Alcaligenes eutrophus* ATCC 17697 ที่มีพอลิ-เบตา-ไฮดรอกซีบิวทิเรตจากน้ำหมักโดยเครื่องกรองระดับอนุภาครูปทรงกระบอกชนิดหมุนได้. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.

รายการอ้างอิง (ต่อ)

14. Speaks, C.E. Introduction to sound. (n.p.): Chapman & Hall, 1992.
15. Renaudin, V., Petrier, C., Bernis, A., Gonthier., Y., Boldo, P. Determination of the reaction zone in and ultrasonic reactor. Third Meeting of the European Society of Sonochemistry March 28-1 April 1993 : 100-101.
16. Geankoplis,C.J. Transport Processes and Unit Operation. New Jersey: PRT Prentice Hall, 1993.
17. Mason,T.J. Elsevier Applied Science Critical Report on Applied on Chemistry. Chemistry with Ultrasound 28(1990).
18. Mason,T.J., and Lorimer,J.P. Sonochemistry theory applications and uses of Ultrasound in Chemistry. (n.p.): John Willy & Sons, 1988.
19. Porter,M.C. Handbook of Industrial Membrane Technology. New Jersey: Noyes Publication, 1998.
20. Rautenbach,R. and Albrecht,R. Membrane Processes.(n.p.): John Willy & Sons, 1989.
21. Shimizu,Y., Mutsushita,K., and Watanabe,A. J. Ferment. Bioeng. 78(1995): 1994-1998.
22. Speaks,C.E. Acoustics for the Hearing and speech Science. (n.p.): Chapman & Hall, 1992.
23. Winston,W.S., and Sirkar,K.K. Membrane Handbook. New York: Ban Nostrand Reinhold, 1992.



ภาคผนวก

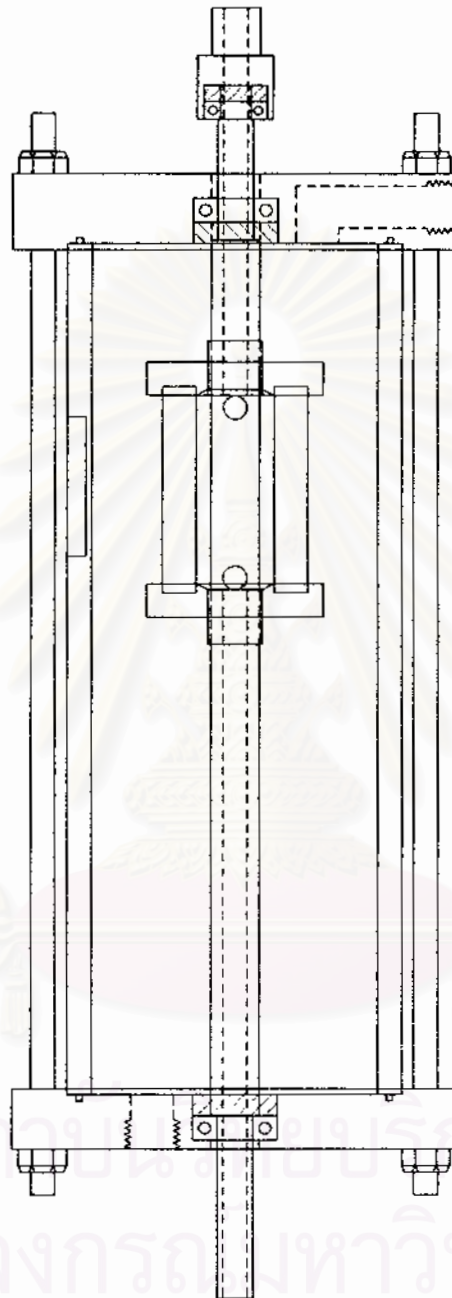
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



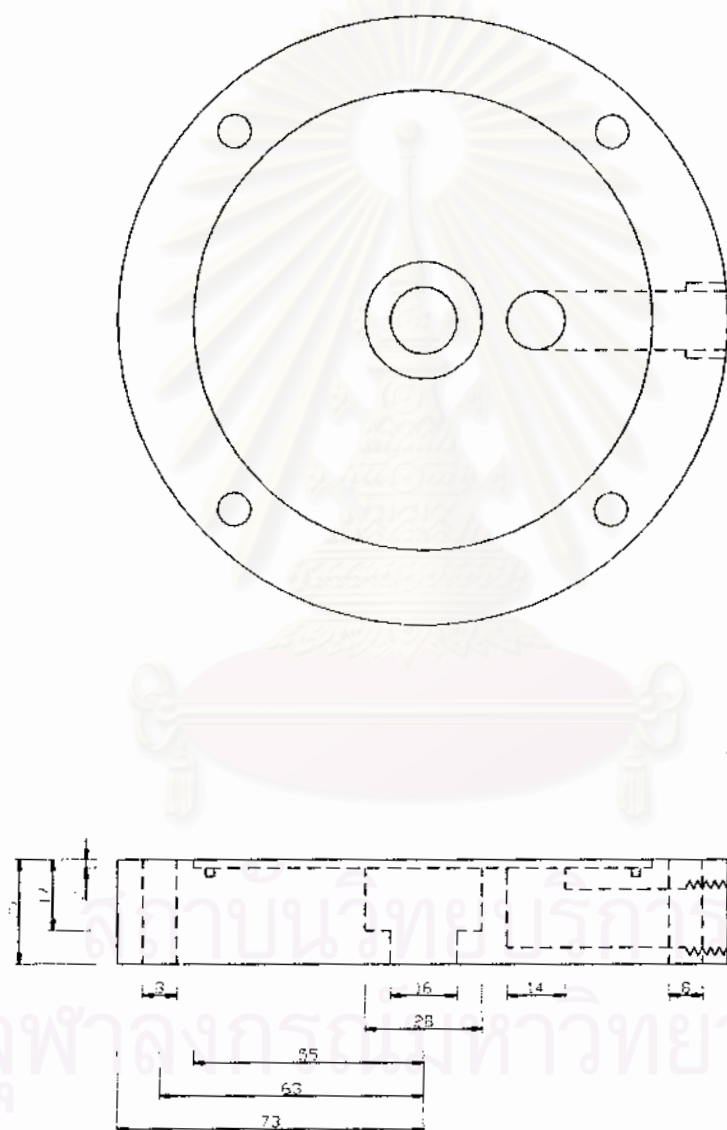
ภาคผนวก ก

แบบเครื่องกรองแบบหมุน

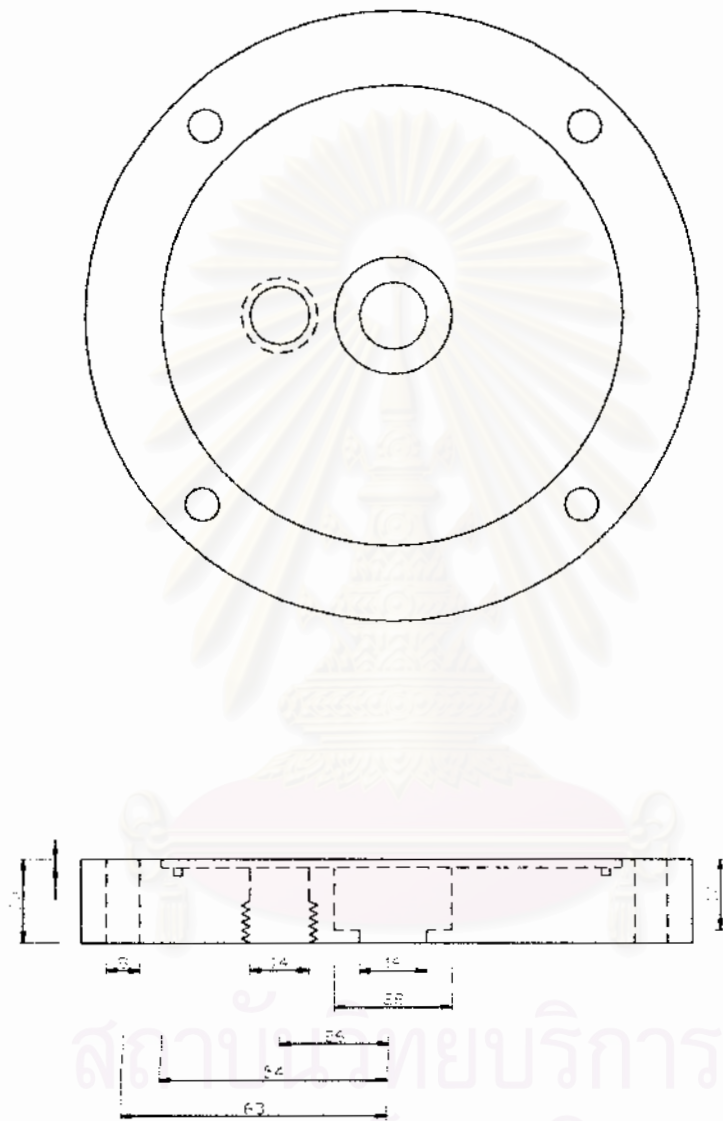
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



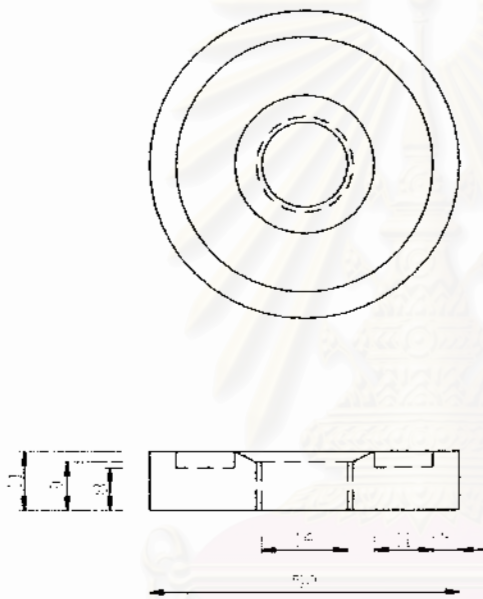
รูปที่ ก1 ภาพประกอบเครื่องกรองแบบหมุนเยื่อแผ่น



รูปที่ ก2 หน้าแปลนทองเหลือง(ชั้นบน)



รูปที่ ก3 หน้าแปลนทองเหลือง (ชั้นล่าง)

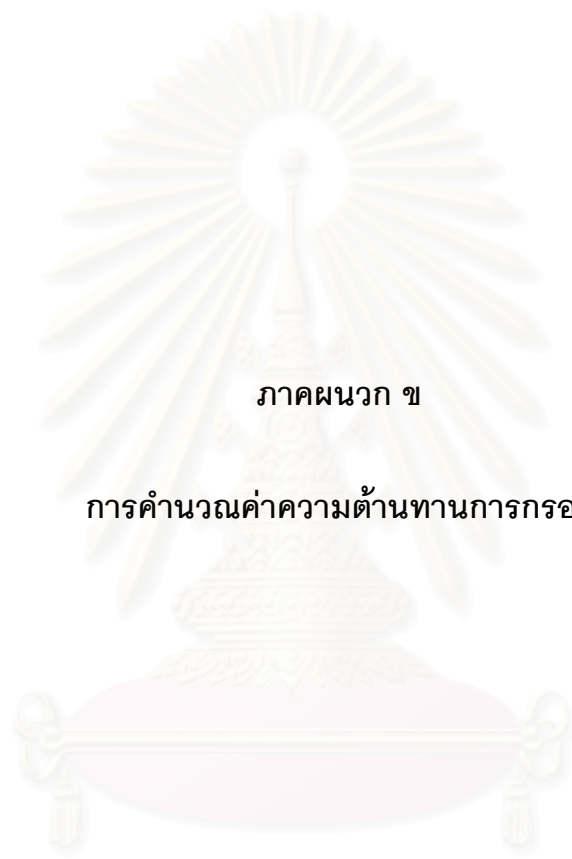


สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ก5 หน้าแปลนสแตนเลสติดท่อเซรามิค (2ชั้น)



รูปที่ ก6 กระบอกอะคริลิคใสด้านนอก



ภาคผนวก ข

การคำนวณค่าความต้านทานการกรอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวอย่างการคำนวณค่าความต้านทานการกรอง

ตัวอย่างการทดลองที่ 100

ความดันคร่อมเยื่อแผ่น	0.22	bar	=	2.20E+04 N/m ²
อัตราการกรองน้ำสะอาดที่ยังไม่ผ่านการกรอง	2.8	cm ³ /s		
ฟลักซ์น้ำสะอาดที่ยังไม่ผ่านการกรอง (J_w)	=	0.0265403	cm ³ /cm ² *s	
อัตราการกรองน้ำสะอาดที่ผ่านการกรองและมีเค้กติดอยู่	0.1283333	cm ³ /s		
ฟลักซ์การกรองน้ำสะอาดที่ผ่านการกรองและมีเค้กติดอยู่ (J_c)	=	0.0012164	cm ³ /cm ² *s	
อัตราการกรองน้ำสะอาดที่ผ่านการกรองและลูปเค้กออกแล้ว	2.6	cm ³ /s		
ฟลักซ์น้ำสะอาดที่ผ่านการกรองและลูปเค้กออกแล้ว (J_p)	=	0.0246445	cm ³ /cm ² *s	
พื้นที่การกรอง	105.5	cm ²		
ความหนืดของของเหลว	0.8007	cp	=	0.0008007 N*s/m ²

- การคำนวณค่าความต้านทานการกรองเยื่อแผ่น (R_M)

$$\begin{aligned}
 J_w &= \frac{\Delta P_{TM}}{\mu R_M} \\
 R_M &= \frac{\Delta P_{TM}}{\mu J_w} \\
 &= \frac{0.22 \times 10^5 \text{ N/m}^2}{0.000801 \text{ N*s/m}^2 \times 0.0265 \text{ cm}^3/\text{cm}^2 \text{ s}} \\
 &= 1.04\text{E}+09 \text{ cm}^{-1}
 \end{aligned}$$

- การคำนวณค่าความต้านทานการกรองในรูพรุน (R_p)

$$\begin{aligned}
 J_p &= \frac{\Delta P_{TM}}{\mu (R_M + R_p)} \\
 R_M + R_p &= \frac{\Delta P_{TM}}{\mu J_p} \\
 &= \frac{0.22 \times 10^5 \text{ N/m}^2}{0.000801 \text{ N*s/m}^2 \times 0.0246 \text{ cm}^3/\text{cm}^2 \text{ s}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 1.11\text{E}+09 \text{ cm}^{-1} \\
 R_p &= 1.11\text{E}+09 - R_M \\
 &= 7.96\text{E}+07 \text{ cm}^{-1}
 \end{aligned}$$

- การคำนวณค่าความต้านทานการกรองของเค้ก (R_C)

$$\begin{aligned}
 J_c &= \frac{\Delta P_{TM}}{\mu (R_M + R_p + R_C)} \\
 R_M + R_p + R_C &= \frac{\Delta P_{TM}}{\mu J_c} \\
 &= \frac{0.22 \times 10^5 \text{ N/m}^2}{0.000801 \text{ N*s/m}^2 \times 0.0012 \text{ cm}^3/\text{cm}^2\text{s}} \\
 &= 2.26\text{E}+10 \text{ cm}^{-1} \\
 R_T &= R_M + R_p + R_C \\
 R_C &= R_T - (R_p + R_C) \\
 &= 2.26\text{E}+10 - 1.11\text{E}+09 \\
 &= 2.15\text{E}+10 \text{ cm}^{-1}
 \end{aligned}$$

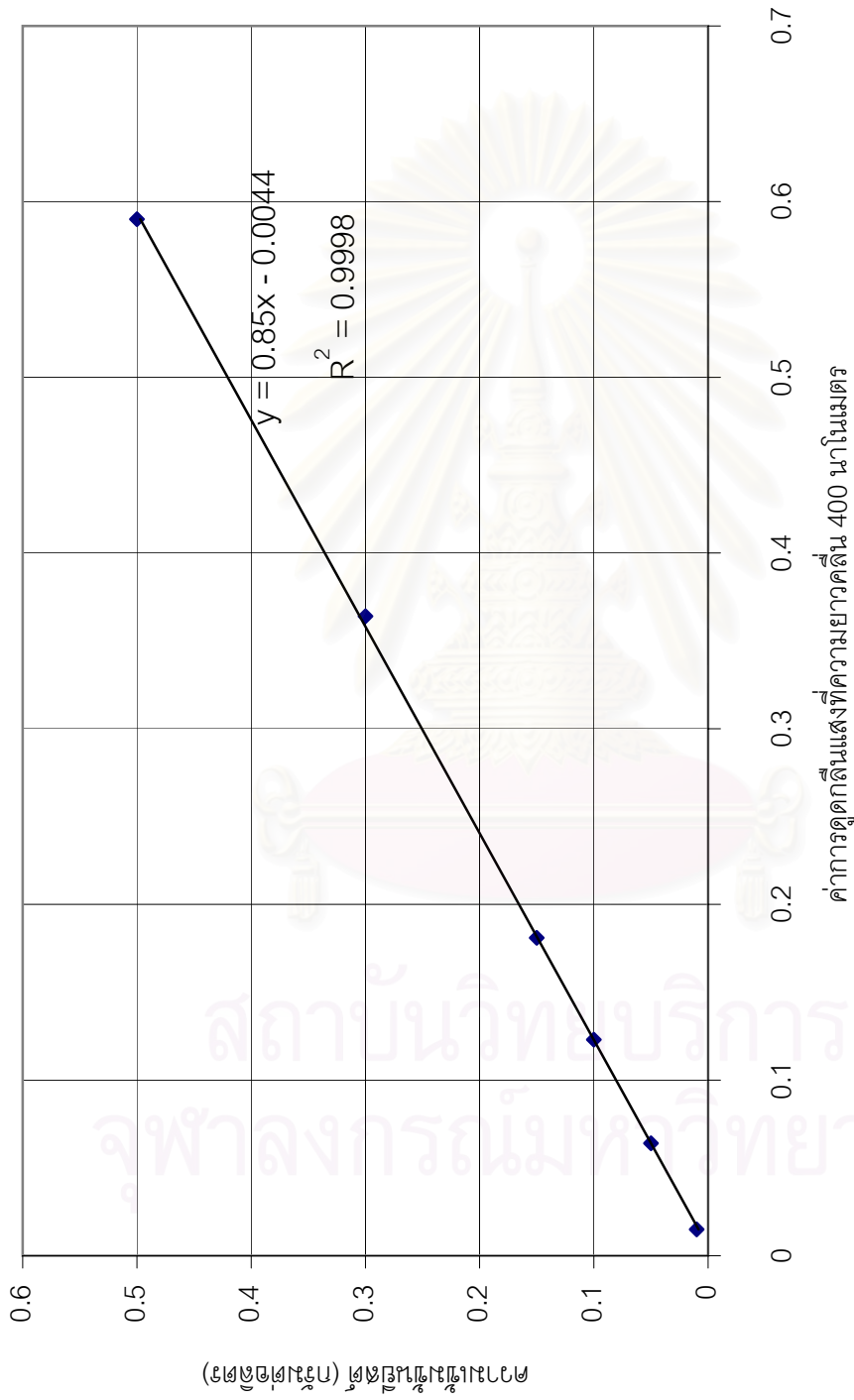
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ค

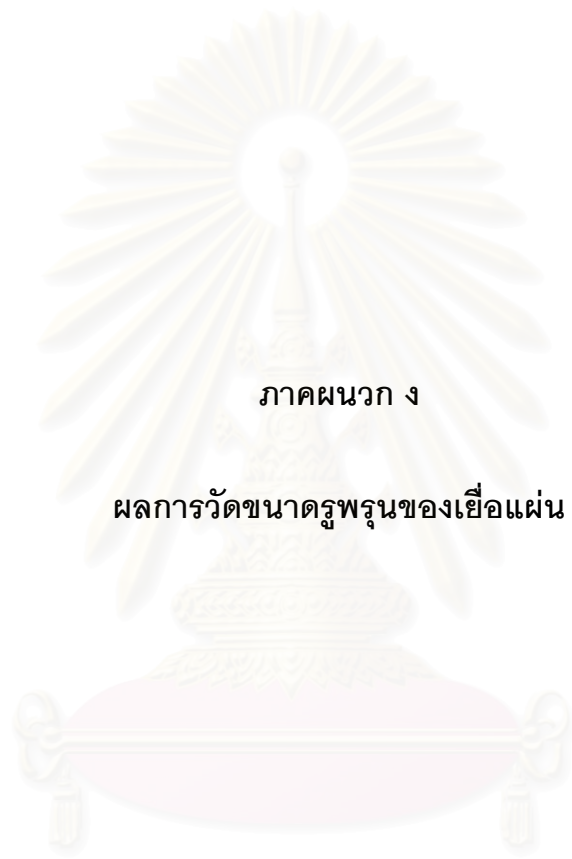
กราฟมาตรฐานความเข้มข้นยีสต์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ๑๑.1 กราฟมาตรฐานความเข้มขั้วโพลาไรซ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ง

ผลการวัดขนาดรูพรุนของเยื่อแผ่น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SAMPLE 1

PORESIZER 9320 V2.04

PAGE 1

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: EDATA /7
 OPERATOR: SDMSRI
 SAMPLE ID: SAMPLE 1
 SUBMITTER: TISTR

LP 13:29:14 01/03/01
 RP 14:06:31 01/03/01
 REP 14:06:32 01/03/01

PENETROMETER NUMBER: 7	ADVANCING CONTACT ANGLE: 130.0 deg
PENETROMETER CONSTANT: 10.79 $\mu\text{L}/\text{pF}$	RECEDING CONTACT ANGLE: 130.0 deg
PENETROMETER WEIGHT: 69.4700 g	MERCURY SURFACE TENSION: 485.0 dyn/cm
STEM VOLUME: 0.3920 mL	MERCURY DENSITY: 13.5335 g/mL
MAXIMUM HEAD PRESSURE: 4.4500 psi	SAMPLE WEIGHT: 0.7800 g
PENETROMETER VOLUME: 6.0500 mL	SAMPLE+PEN+Hg WEIGHT: 139.7600 g

LOW PRESSURE:

MERCURY FILLING PRESSURE: 1.4425 psia
 LAST LOW PRESSURE POINT: 24.6334 psia

HIGH PRESSURE:

RUN TYPE: AUTOMATIC
 RUN METHOD: EQUILIBRATED
 EQUILIBRATION TIME: 10 seconds

INTRUSION DATA SUMMARY

TOTAL INTRUSION VOLUME =	0.4776 mL/g
TOTAL PORE AREA =	0.693 m^2/g
MEDIAN PORE DIAMETER (VOLUME) =	2.4185 μm
MEDIAN PORE DIAMETER (AREA) =	2.5303 μm
AVERAGE PORE DIAMETER (4V/A) =	2.7562 μm
BULK DENSITY =	0.8535 g/mL
APPARENT (SKELETAL) DENSITY =	1.4409 g/mL
POROSITY =	40.77 %
STEM VOLUME USED =	95 % ****

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SAMPLE 4

PORESIZER 9320 V2.04

PAGE 1

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: EDATA /11
 OPERATOR: SOMSRI
 SAMPLE ID: SAMPLE 4
 SUBMITTER: TISTR

LP 13:11:23 01/04/01
 HP 13:48:43 01/04/01
 REP 14:07:45 01/04/01

PENETROMETER NUMBER: 7
 PENETROMETER CONSTANT: 10.79 $\mu\text{L}/\mu\text{F}$
 PENETROMETER WEIGHT: 69.4500 g
 STEM VOLUME: 0.3920 mL
 MAXIMUM HEAD PRESSURE: 4.4500 psi
 PENETROMETER VOLUME: 6.0500 mL

ADVANCING CONTACT ANGLE: 130.0 deg
 RECEDING CONTACT ANGLE: 130.0 deg
 MERCURY SURFACE TENSION: 485.0 dyn/cm
 MERCURY DENSITY: 13.5335 g/mL
 SAMPLE WEIGHT: 0.5000 g
 SAMPLE+PEN+Hg WEIGHT: 143.4700 g

LOW PRESSURE:

MERCURY FILLING PRESSURE: 1.6217 psia
 LAST LOW PRESSURE POINT: 24.6635 psia

HIGH PRESSURE:

RUN TYPE: AUTOMATIC
 RUN METHOD: EQUILIBRATED
 EQUILIBRATION TIME: 10 seconds

INTRUSION DATA SUMMARY

TOTAL INTRUSION VOLUME = 0.7222 mL/g
 TOTAL PORE AREA = 1.256 $\text{sq-m}/\text{g}$
 MEDIAN PORE DIAMETER (VOLUME) = 2.2962 μm
 MEDIAN PORE DIAMETER (AREA) = 2.2429 μm
 AVERAGE PORE DIAMETER (4V/A) = 2.3007 μm
 BULK DENSITY = 0.8096 g/mL
 APPARENT (SKELETAL) DENSITY = 1.9495 g/mL
 POROSITY = 58.47 %
 STEM VOLUME USED = 92 % ****

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SAMPLE 5

FORESIZER 9320 V2.04

PAGE 1

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: EDATA /13
 OPERATOR: SDMSRI
 SAMPLE ID: SAMPLE 5
 SUBMITTER: TISTR

LP 10:00:50 01/05/01
 HP 10:38:18 01/05/01
 REP 10:38:18 01/05/01

PENETROMETER NUMBER: 7	ADVANCING CONTACT ANGLE: 130.0 deg
PENETROMETER CONSTANT: 10.79 $\mu\text{L}/\text{pF}$	RECEDING CONTACT ANGLE: 130.0 deg
PENETROMETER WEIGHT: 69.4600 g	MERCURY SURFACE TENSION: 485.0 dyn/cm
STEM VOLUME: 0.3920 mL	MERCURY DENSITY: 13.5335 g/mL
MAXIMUM HEAD PRESSURE: 4.4500 psi	SAMPLE WEIGHT: 0.4200 g
PENETROMETER VOLUME: 6.0500 mL	SAMPLE+PEN+Hg WEIGHT: 145.4300 g

LOW PRESSURE:
 MERCURY FILLING PRESSURE: 1.7637 psia
 LAST LOW PRESSURE POINT: 24.5780 psia

HIGH PRESSURE:
 RUN TYPE: AUTOMATIC
 RUN METHOD: EQUILIBRATED
 EQUILIBRATION TIME: 10 seconds

INTRUSION DATA SUMMARY

TOTAL INTRUSION VOLUME =	0.6863 mL/g
TOTAL PORE AREA =	3.363 sq-m/g
MEDIAN PORE DIAMETER (VOLUME) =	2.1546 μm
MEDIAN PORE DIAMETER (AREA) =	0.0250 μm
AVERAGE PORE DIAMETER (AV/A) =	0.8163 μm
BULK DENSITY =	0.8980 g/mL
APPARENT (SKELETAL) DENSITY =	2.3424 g/mL
POROSITY =	61.65 %
STEM VOLUME USED =	74 %

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SAMPLE 6

PORESIZER 9320 V2.04

PAGE 1

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: EDATA /14
 OPERATOR: SOMSRI
 SAMPLE ID: SAMPLE 6
 SUBMITTER: TISTR

LP 15:03:14 01/05/01
 HP 08:47:54 01/08/01
 REP 08:47:54 01/08/01

PENETROMETER NUMBER: 7
 PENETROMETER CONSTANT: 10.79 $\mu\text{L}/\text{pF}$
 PENETROMETER WEIGHT: 69.4600 g
 STEM VOLUME: 0.3920 mL
 MAXIMUM HEAD PRESSURE: 4.4500 psi
 PENETROMETER VOLUME: 6.0500 mL

ADVANCING CONTACT ANGLE: 130.0 deg
 RECEDING CONTACT ANGLE: 130.0 deg
 MERCURY SURFACE TENSION: 485.0 dyn/cm
 MERCURY DENSITY: 13.5335 g/mL
 SAMPLE WEIGHT: 0.4700 g
 SAMPLE+PEN+Hg WEIGHT: 144.1300 g

LOW PRESSURE:
 MERCURY FILLING PRESSURE: 1.6557 psia
 LAST LOW PRESSURE POINT: 24.4687 psia

HIGH PRESSURE:
 RUN TYPE: AUTOMATIC
 RUN METHOD: EQUILIBRATED
 EQUILIBRATION TIME: 10 seconds

INTRUSION DATA SUMMARY

TOTAL INTRUSION VOLUME = 0.7501 mL/g
 TOTAL PORE AREA = 1.363 sq-m/g
 MEDIAN PORE DIAMETER (VOLUME) = 2.2452 μm
 MEDIAN PORE DIAMETER (AREA) = 2.1873 μm
 AVERAGE PORE DIAMETER (4V/A) = 2.2017 μm
 BULK DENSITY = 0.8285 g/mL
 APPARENT (SKELETAL) DENSITY = 2.1883 g/mL
 POROSITY = 62.14 %
 STEM VOLUME USED = 90 %

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

XXXXXXX

PORESIZER 9320 V2.04

PAGE 1

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: EDATA /27
 OPERATOR: CHUMPHOL
 SAMPLE ID: 10(outside)
 SUBMITTER: TISTR

LP 11:46:23 01/25/01
 HP 12:26:46 01/25/01
 REP 12:26:46 01/25/01

PENETROMETER NUMBER: 7	ADVANCING CONTACT ANGLE: 130.0 deg
PENETROMETER CONSTANT: 10.79 $\mu\text{L/pF}$	RECEDING CONTACT ANGLE: 130.0 deg
PENETROMETER WEIGHT: 69.4100 g	MERCURY SURFACE TENSION: 485.0 dyn/cm
STEM VOLUME: 0.3920 mL	MERCURY DENSITY: 13.5335 g/mL
MAXIMUM HEAD PRESSURE: 4.4500 psi	SAMPLE WEIGHT: 0.6300 g
PENETROMETER VOLUME: 6.0500 mL	SAMPLE+PEN+Hg WEIGHT: 142.4700 g

LOW PRESSURE:

MERCURY FILLING PRESSURE: 0.5570 psia
 LAST LOW PRESSURE POINT: 24.4310 psia

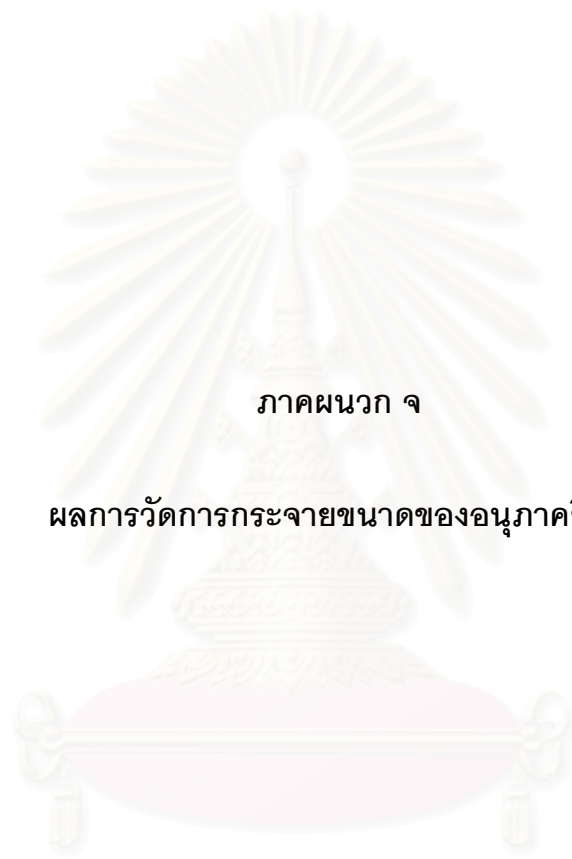
HIGH PRESSURE:

RUN TYPE: AUTOMATIC
 RUN METHOD: EQUILIBRATED
 EQUILIBRATION TIME: 10 seconds

INTRUSION DATA SUMMARY
 (FROM PRESSURE 0.00 TO 30000.00 psia)

TOTAL INTRUSION VOLUME =	0.5840 mL/g
TOTAL PORE AREA =	0.978 sq-m/g
MEDIAN PORE DIAMETER (VOLUME) =	2.3361 μm
MEDIAN PORE DIAMETER (AREA) =	2.2982 μm
AVERAGE PORE DIAMETER (4V/A) =	2.3881 μm
BULK DENSITY =	0.9025 g/mL
APPARENT (SKELETAL) DENSITY =	1.9079 g/mL
POROSITY =	52.70 %
STEM VOLUME USED =	94 % ****

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก จ

ผลการวัดการกระจายขนาดของอนุภาคยีสต์

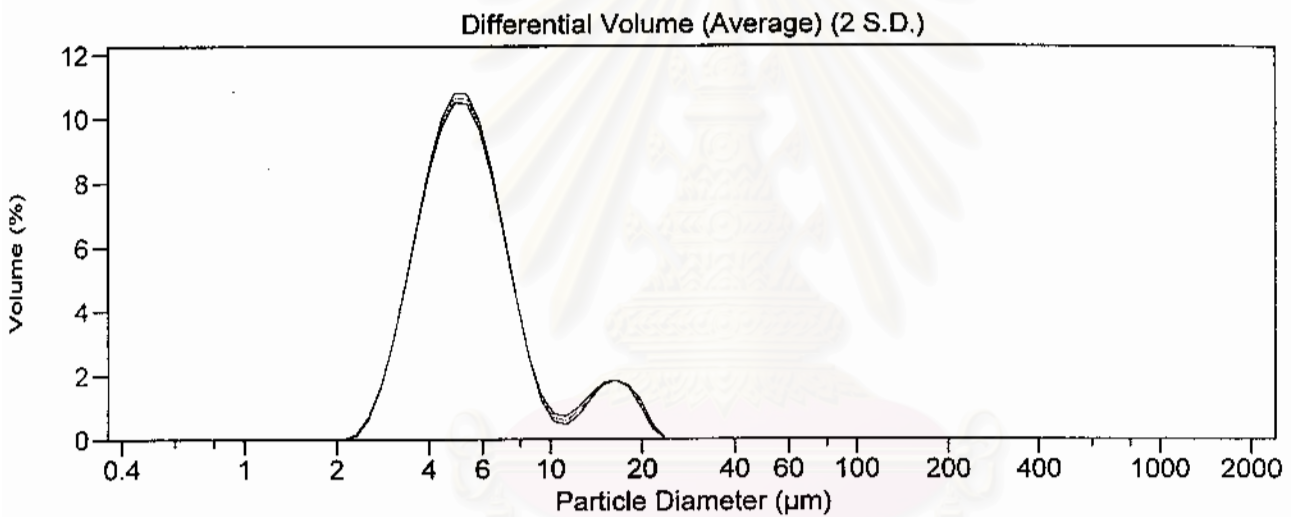
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



LS Particle Size Analyzer

6 Jan 2001

Sample name: POMA.\$33 Group ID: pom
 Sample ID: 157_0
 Analytical model: Fraunhofer
 Model: 230 Small Volume Module
 Run time: Run length: 60 Seconds
 Dispersion: 9%
 Medium: Water
 Average of 3 Files:
 File: pom.\$32 pom.\$33
 Firmware: 2.11 Firmware: 2.02 2.02



Volume Statistics (Arithmetic) poma.\$33

Calculations from 0.375 µm to 2000 µm

Volume	100.0%	S.D.:	3.581 µm
Mean	6.304 µm	C.V.:	56.8%
Median	5.286 µm	Skewness:	2.226 Right skewed
Mode	5.189 µm	Kurtosis:	4.813 Leptokurtic
Standard Deviation	4.878 µm		

% <	10	25	50	75	90
Size µm	3.491	4.209	5.286	6.760	10.25

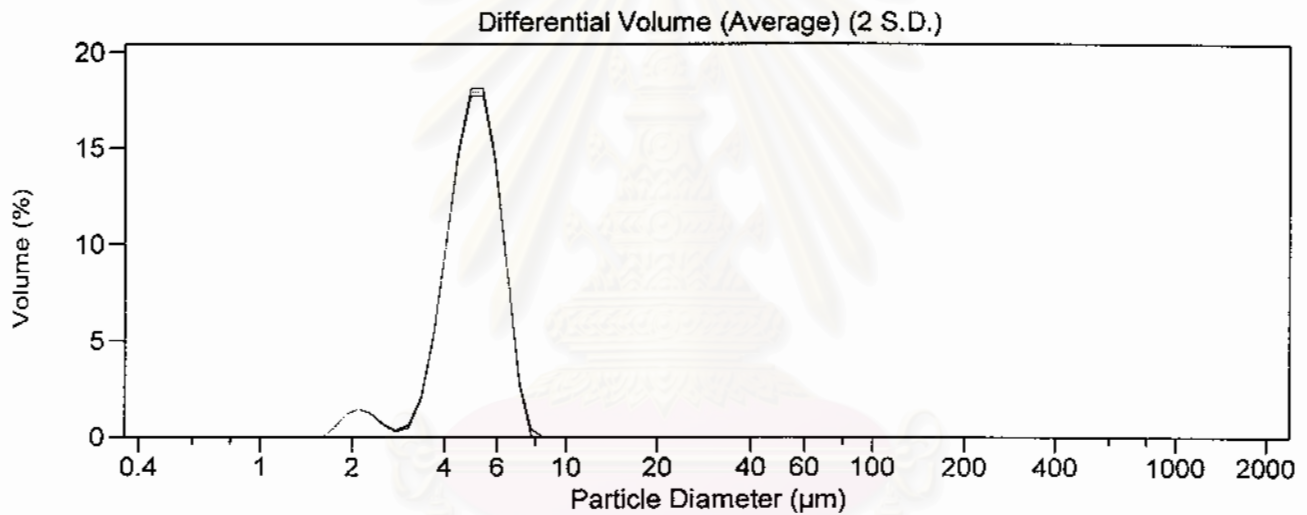


LS Particle Size Analyzer

COULTER

6 Jan 2001

File name: POMA.\$36 Group ID: pom
 Sample ID: 157_30
 Optical model: Fraunhofer
 LS 230 Small Volume Module
 Start time: Run length: 60 Seconds
 Obscuration: 8%
 Fluid: Water
 Average of 3 Files:
 pom.\$34 pom.\$35 pom.\$36
 Software: 2.11 Firmware: 2.02 2.02



Volume Statistics (Arithmetic)

poma.\$36

Calculations from 0.375 μm to 2000 μm

Volume	100.0%	S.D.:	1.086 μm
Mean:	4.917 μm	C.V.:	22.1%
Median:	4.962 μm	Skewness:	-0.510 Left skewed
D(3,2):	4.595 μm	Kurtosis:	0.503 Leptokurtic
Mode:	5.355 μm		

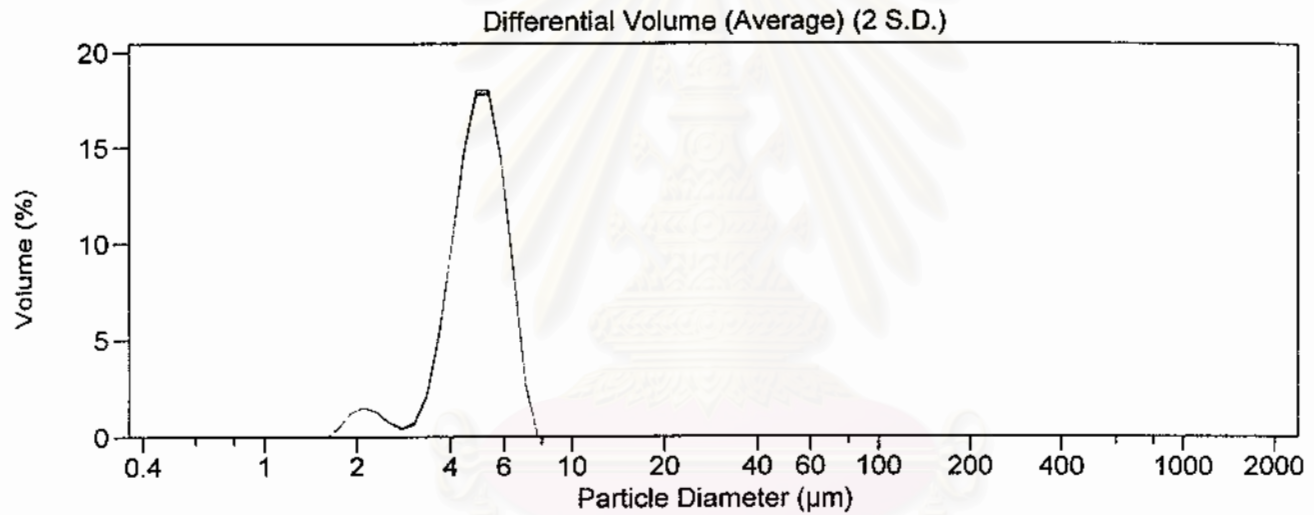
% <	10	25	50	75	90
Size μm	3.653	4.291	4.962	5.657	6.275


COULTER

LS Particle Size Analyzer

6 Jan 2001

File name: POMA.\$39 Group ID: pom
 Sample ID: 157_60
 Optical model: Fraunhofer
 LS 230 Small Volume Module
 Start time: Run length: 60 Seconds
 Obscuration: 10%
 Fluid: Water
 Average of 3 Files:
 pom.\$37 pom.\$38 pom.\$39
 Software: 2.11 Firmware: 2.02 2.02



Volume Statistics (Arithmetic)

poma.\$39

Calculations from 0.375 µm to 2000 µm

Volume	100.0%	S.D.:	1.091 µm
Mean:	4.890 µm	C.V.:	22.3%
Median:	4.944 µm	Skewness:	-0.530 Left skewed
D(3,2):	4.563 µm	Kurtosis:	0.453 Leptokurtic
Mode:	4.878 µm		

% <	10	25	50	75	90
Size µm	3.613	4.272	4.944	5.632	6.245



LS Particle Size Analyzer

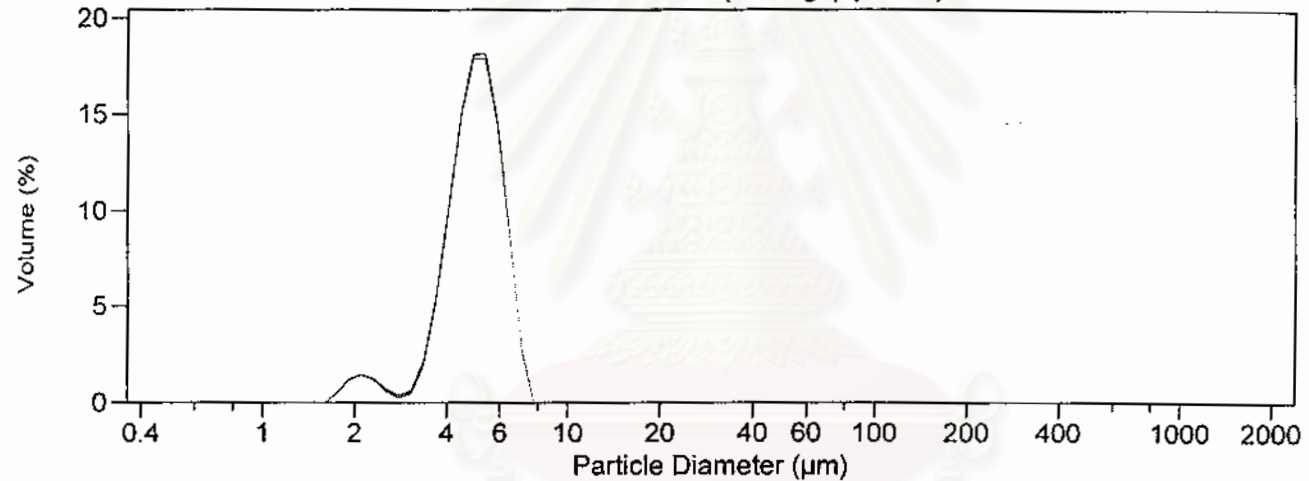
COULTER

6 Jan 2001

```

File name:      POMA.$42          Group ID:      pom
Sample ID:     157_90
Optical model: Fraunhofer
S 230         Small Volume Module
Start time:
Obscuration:   9%
Fluid:         Water
Average of 3 Files:
Pom.$40       pom.$41          pom.$42
Software:     2.11             Firmware:     2.02 2.02
  
```

Differential Volume (Average) (2 S.D.)



Volume Statistics (Arithmetic)

poma.\$42

Calculations from 0.375 µm to 2000 µm

Volume	100.0%	S.D.:	1.079 µm
Mean:	4.906 µm	C.V.:	22.0%
Median:	4.953 µm	Skewness:	-0.525 Left skewed
(3,2):	4.588 µm	Kurtosis:	0.509 Leptokurtic
Mode:	4.878 µm		

% <	10	25	50	75	90
Size µm	3.652	4.286	4.953	5.640	6.252

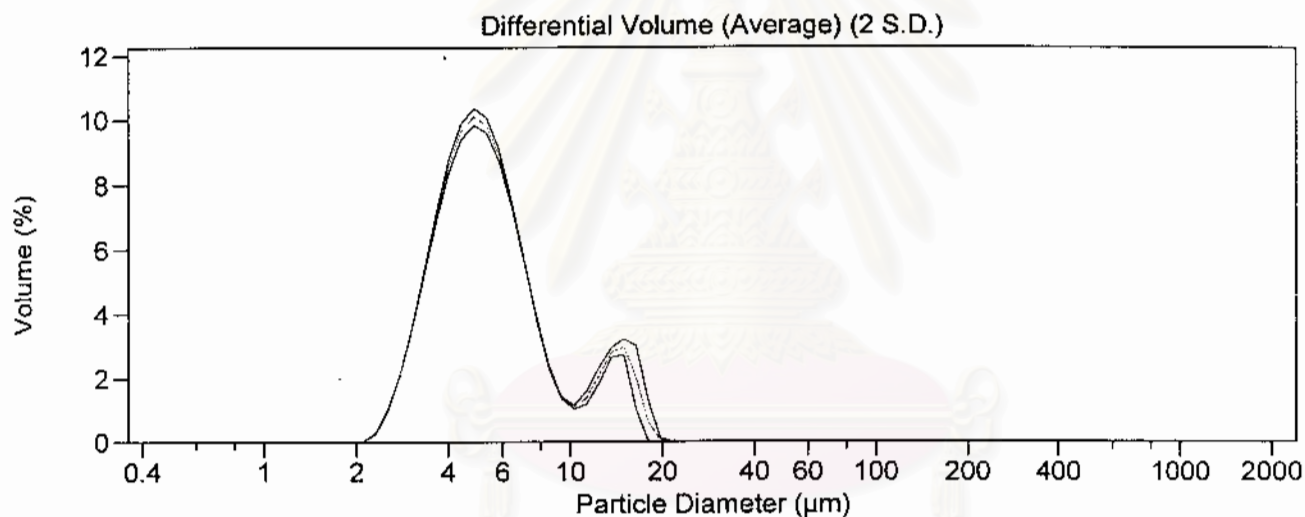


LS Particle Size Analyzer

COULTER

8 Dec 2000

File name: Group ID: 1
 Sample ID: 1
 Operator: pom
 Comments: 0min
 Optical model: Fraunhofer
 LS 230 Small Volume Module
 Start time: Run length: 60 Seconds
 Obscuration: 9%
 Fluid: Water
 Average of 3 Files:
 1.\$01 1.\$02 1.\$03
 Software: 2.11 Firmware: 2.02 2.02



Volume Statistics (Arithmetic) (Untitled)

Calculations from 0.375 μm to 2000 μm

Volume	100.0%	S.D.:	3.335 μm
Mean:	6.259 μm	C.V.:	53.3%
Median:	5.231 μm	Skewness:	1.697 Right skewed
D(3,2):	5.136 μm	Kurtosis:	2.254 Leptokurtic
Mode:	4.878 μm		

% <	10	25	50	75	90
Size μm	3.384	4.113	5.231	6.902	12.09

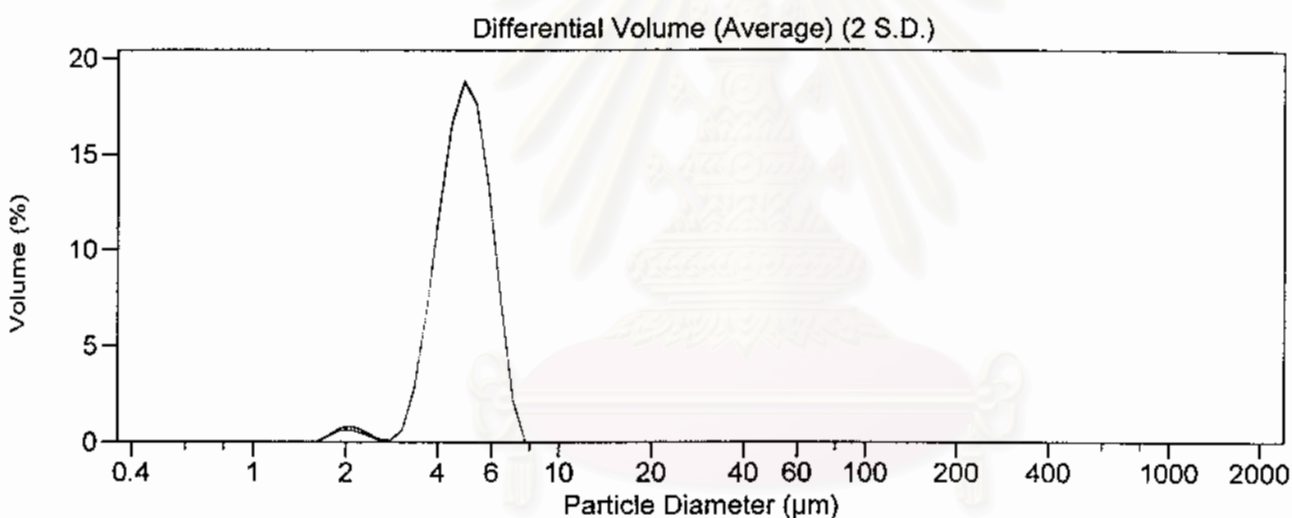


LS Particle Size Analyzer

COULTER

8 Dec 2000

Sample name: Group ID: 1
 Sample ID: 2
 Operator: pom
 Comments: 30min
 Optical model: Fraunhofer
 Part 230: Small Volume Module
 Start time: Run length: 60 Seconds
 Obscuration: 9%
 Fluid: Water
 Average of 3 Files:
 File 1: 1.505 1.506
 File 2:
 File 3:
 Software: 2.11 Firmware: 2.02 2.02



Volume Statistics (Arithmetic) (Untitled)

Calculations from 0.375 μm to 2000 μm

Volume	100.0%		
Mean:	4.882 μm	S.D.:	0.967 μm
Median:	4.873 μm	C.V.:	19.8%
Q3,2):	4.651 μm	Skewness:	-0.229 Left skewed
Mode:	4.878 μm	Kurtosis:	0.417 Leptokurtic

% <	10	25	50	75	90
Size μm	3.729	4.252	4.873	5.541	6.131

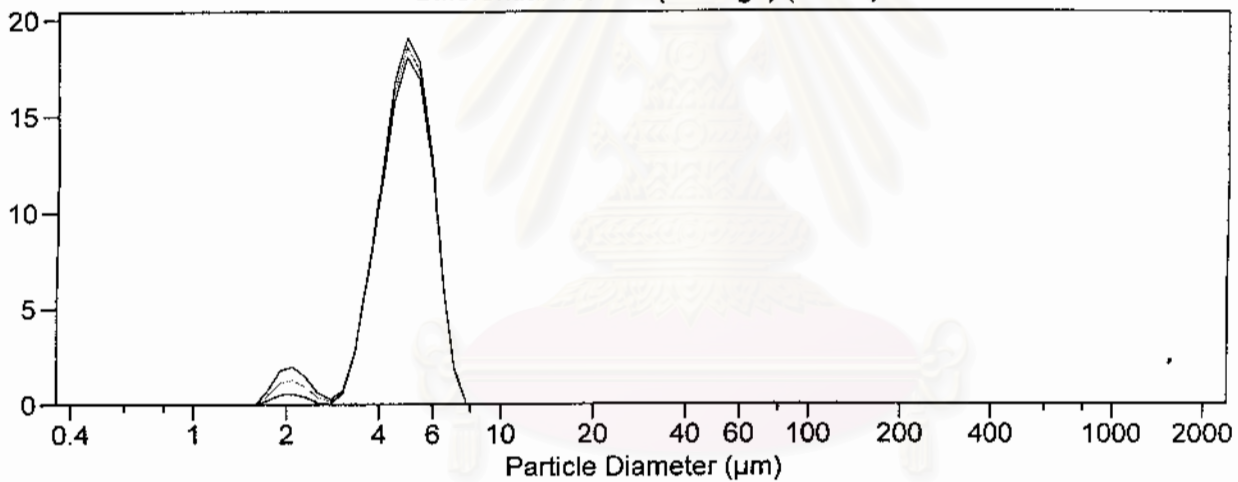


LS Particle Size Analyzer

8 Dec 2000

Name: Group ID: 2
 File ID: 3
 Operator: pom
 Duration: 60min
 Instrument model: Fraunhofer
 Module: Small Volume Module
 Run length: 60 Seconds
 Dilution: 11%
 Dispersant: Water
 Number of Files: 2.\$02 2.\$03
 Software: 2.11 Firmware: 2.02 2.02

Differential Volume (Average) (2 S.D.)



Volume Statistics (Arithmetic) (Untitled)

Calculations from 0.375 µm to 2000 µm

Volume	100.0%		
Mean	4.819 µm	S.D.:	1.025 µm
Median	4.841 µm	C.V.:	21.3%
Mode	4.536 µm	Skewness:	-0.417 Left skewed
	4.878 µm	Kurtosis:	0.543 Leptokurtic

Count	10	25	50	75	90
Size µm	3.634	4.204	4.841	5.514	6.106

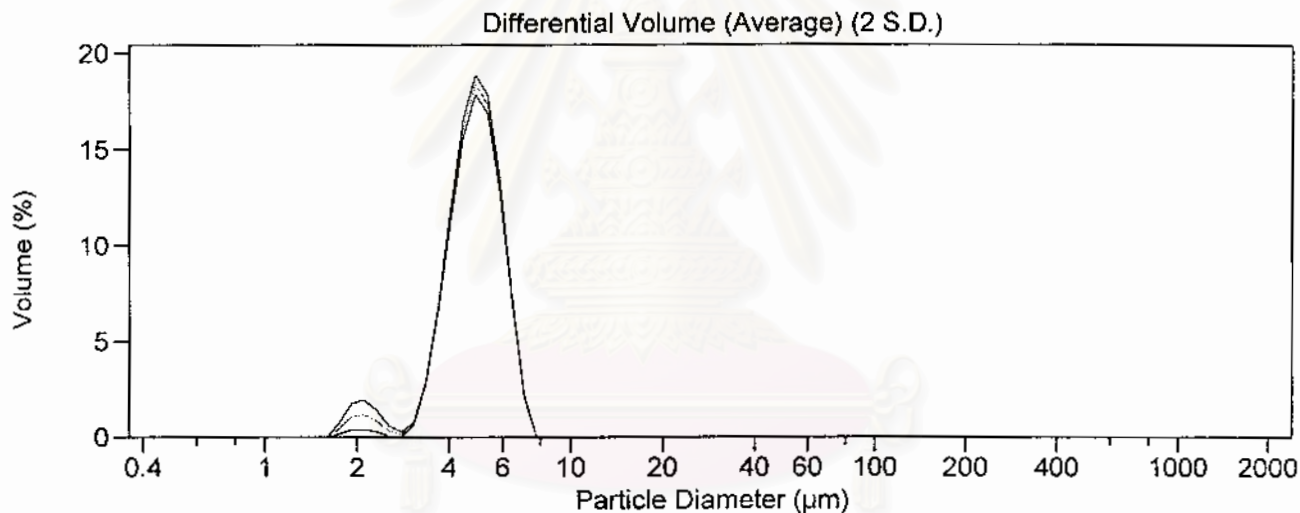


LS Particle Size Analyzer

COULTER

8 Dec 2000

File name: Group ID: 2
 Sample ID: 4
 Operator: pom
 Comments: 90min
 Optical model: Fraunhofer
 LS 230 Small Volume Module
 Start time: Run length: 60 Seconds
 Obscuration: 9%
 Fluid: Water
 Average of 3 Files:
 2.\$04 2.\$05 2.\$06
 Software: 2.11 Firmware: 2.02 2.02



Volume Statistics (Arithmetic) (Untitled)

Calculations from 0.375 μm to 2000 μm

Volume	100.0%	S.D.:	1.028 μm
Mean:	4.839 μm	C.V.:	21.3%
Median:	4.857 μm	Skewness:	-0.390 Left skewed
D(3,2):	4.557 μm	Kurtosis:	0.490 Leptokurtic
Mode:	4.878 μm		

% <	10	25	50	75	90
Size μm	3.641	4.212	4.857	5.537	6.132



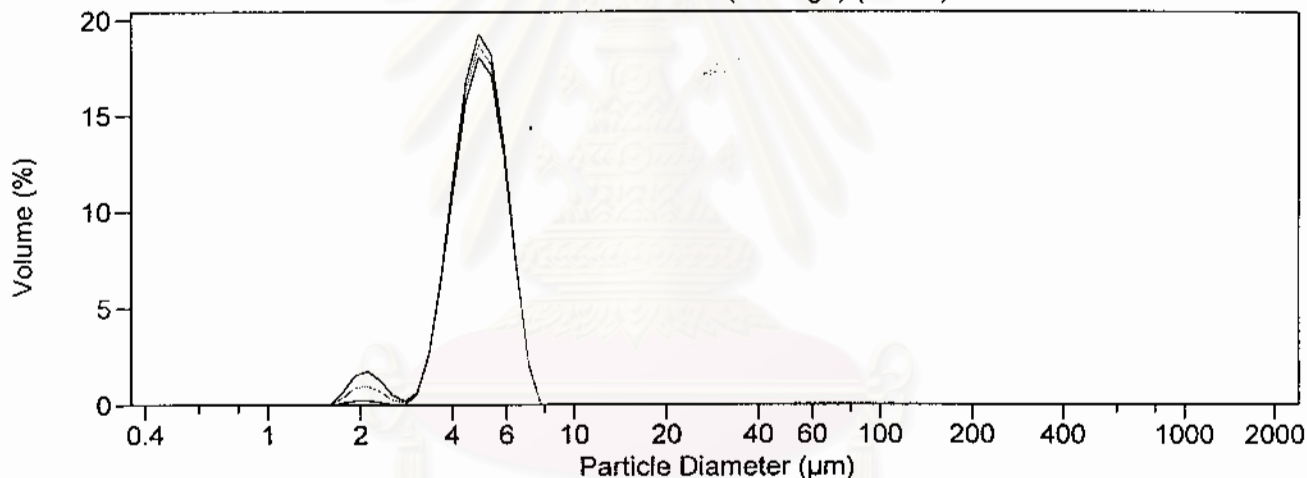
LS Particle Size Analyzer

COULTER

8 Dec 2000

File name: Group ID: 2
 Sample ID: 5
 Operator: pom
 Optical model: Fraunhofer
 LS 230 Small Volume Module
 Start time: Run length: 60 Seconds
 Obscuration: 9%
 Fluid: Water
 Average of 3 Files:
 2.\$07 2.\$08 2.\$09
 Software: 2.11 Firmware: 2.02 2.02

Differential Volume (Average) (2 S.D.)



Volume Statistics (Arithmetic)

(Untitled)

Calculations from 0.375 µm to 2000 µm

Volume	100.0%		
Mean:	4.866 µm	S.D.:	0.998 µm
Median:	4.874 µm	C.V.:	20.5%
D(3,2):	4.608 µm	Skewness:	-0.346 Left skewed
Mode:	4.878 µm	Kurtosis:	0.516 Leptokurtic

% <	10	25	50	75	90
Size µm	3.695	4.246	4.874	5.544	6.131

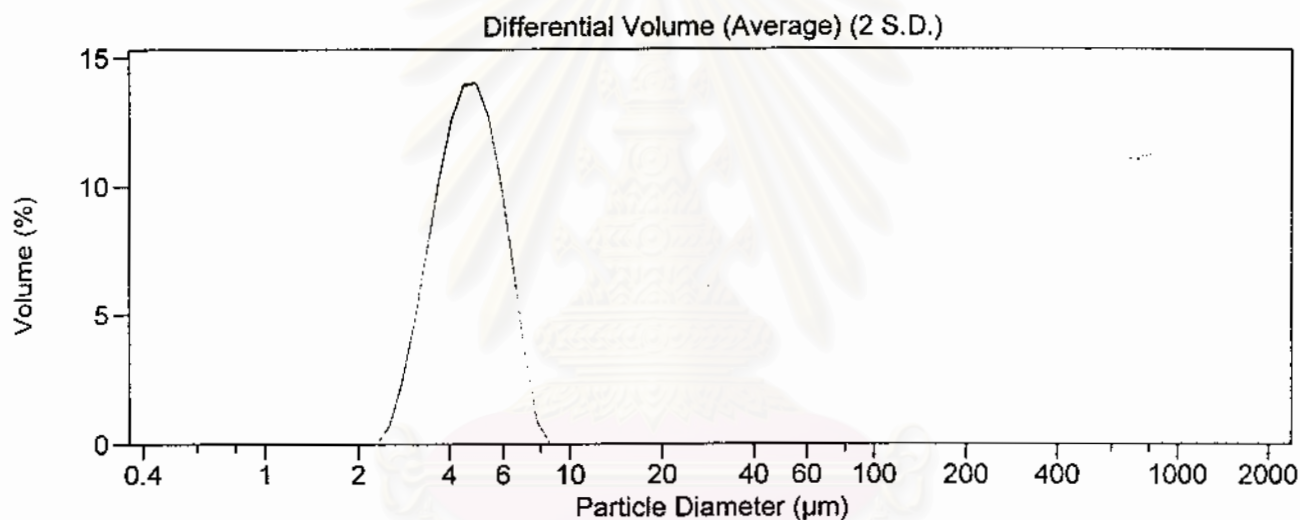


LS Particle Size Analyzer

COULTER

19 Feb 2001

File name: poma.\$51 Group ID: pom
 Sample ID: probe_5
 Optical model: Fraunhofer
 LS 230 Small Volume Module
 Start time: Run length: 60 Seconds
 Obscuration: 10%
 Fluid: Water
 Average of 3 Files:
 pom.\$49 pom.\$50 pom.\$51
 Software: 2.11 Firmware: 2.02 2.02



Volume Statistics (Arithmetic)

poma.\$51

Calculations from 0.375 μm to 2000 μm

Volume	100.0%	S.D.:	1.116 μm
Mean:	4.702 μm	C.V.:	23.7%
Median:	4.602 μm	Skewness:	0.392 Right skewed
D(3,2):	4.441 μm	Kurtosis:	-0.385 Platykurtic
Mode:	4.878 μm		

% <	10	25	50	75	90
Size μm	3.300	3.850	4.602	5.472	6.271

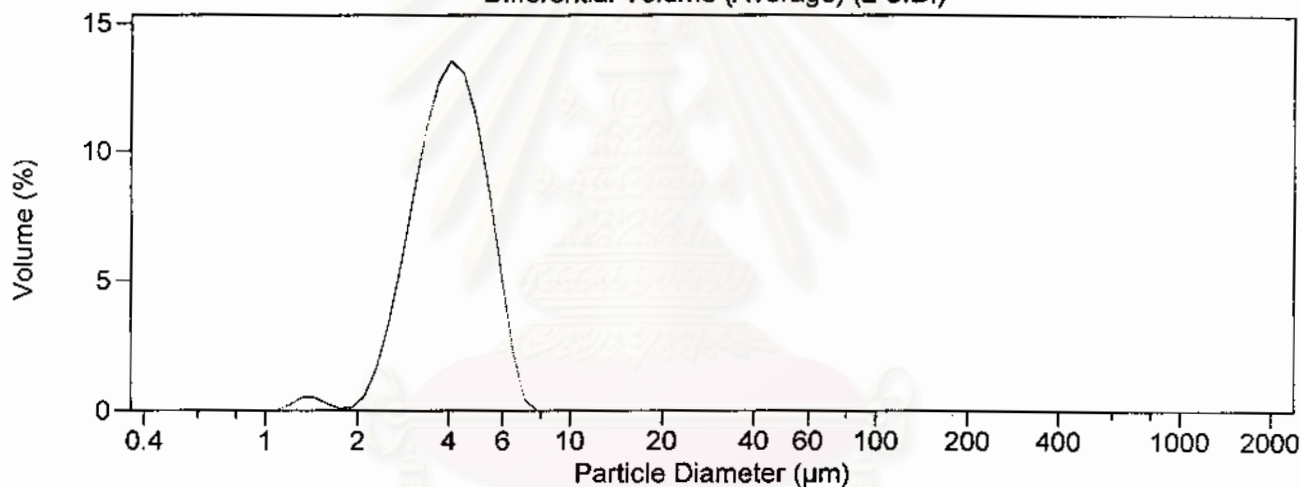


LS Particle Size Analyzer

19 Feb 2001

File name: poma.\$54 Group ID: pom
 Sample ID: probe_15
 Optical model: Fraunhofer
 LS 230 Small Volume Module
 Start time: Run length: 60 Seconds
 Obscuration: 8%
 Fluid: Water
 Average of 3 Files:
 pom.\$52 pom.\$53 pom.\$54
 Software: 2.11 Firmware: 2.02 2.02

Differential Volume (Average) (2 S.D.)



Volume Statistics (Arithmetic)

poma.\$54

Calculations from 0.375 µm to 2000 µm

Volume	100.0%	S.D.:	1.058 µm
Mean:	4.063 µm	C.V.:	26.0%
Median:	3.999 µm	Skewness:	0.173 Right skewed
D(3,2):	3.752 µm	Kurtosis:	-0.133 Platykurtic
Mode:	4.047 µm		

% <	10	25	50	75	90
Size µm	2.776	3.305	3.999	4.787	5.511



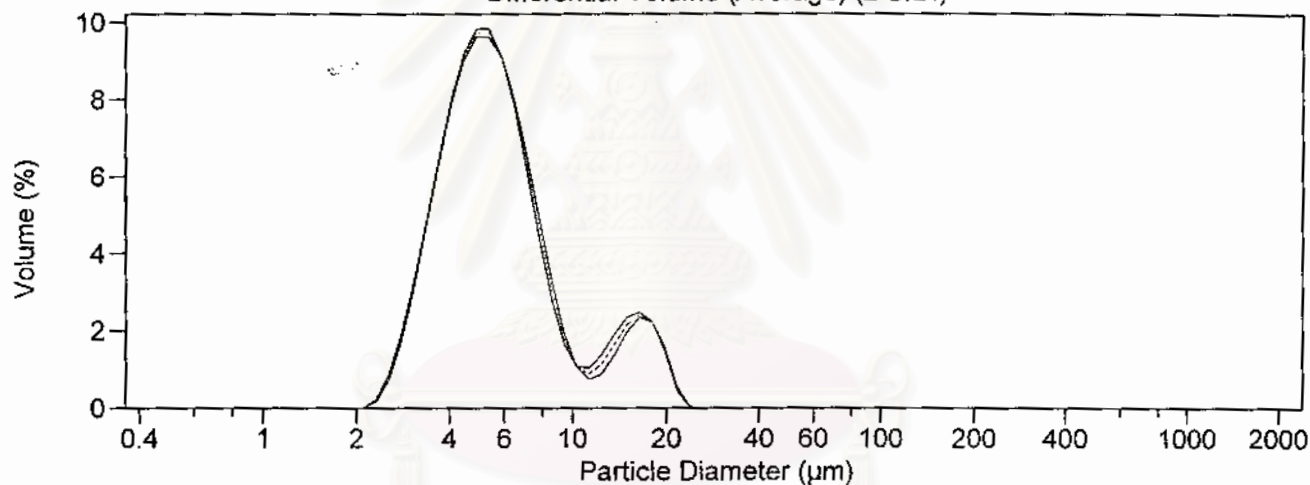
LS Particle Size Analyzer

COULTER

19 Feb 2001

File name:	poma.\$61	Group ID:	pom
Sample ID:	v3		
Operator:	pom		
Optical model:	Fraunhofer		
LS 230	Small Volume Module		
Start time:		Run length:	60 Seconds
Obscuration:	8%		
Fluid:	Water		
Average of 2 Files:			
pom.\$61	pom.\$63		
Software:	2.11	Firmware:	2.02 2.02

Differential Volume (Average) (2 S.D.)



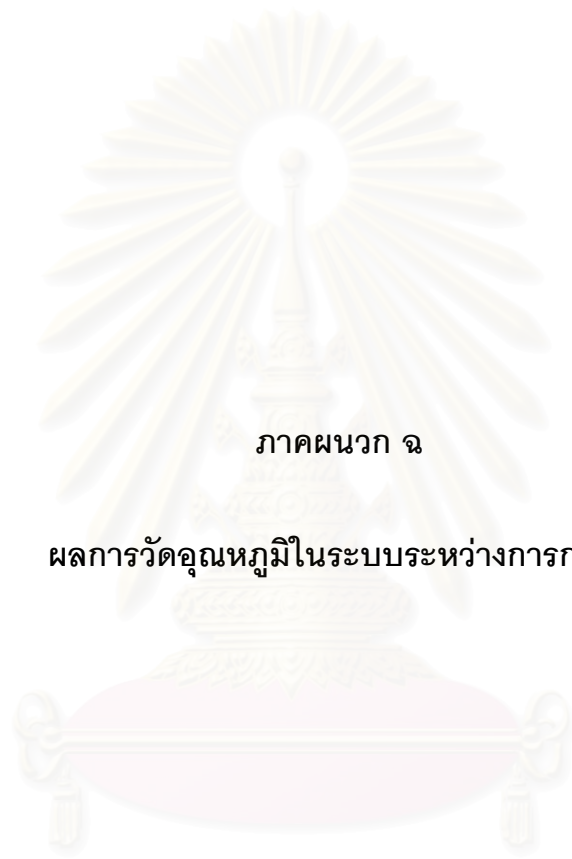
Volume Statistics (Arithmetic)

poma.\$61

Calculations from 0.375 µm to 2000 µm

Volume	100.0%		
Mean:	6.679 µm	S.D.:	3.964 µm
Median:	5.427 µm	C.V.:	59.4%
D(3,2):	5.326 µm	Skewness:	1.904 Right skewed
Mode:	4.878 µm	Kurtosis:	3.064 Leptokurtic

% <	10	25	50	75	90
Size µm	3.472	4.238	5.427	7.221	13.35



ภาคผนวก ฉ

ผลการวัดคุณหมุ่ในระบระหว่างกรกรรกร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการทดลองวัดค่าอุณหภูมิในถังป้อนที่เวลาต่างๆ ขณะทำการทดลองที่ไม่มีการควบคุม
อุณหภูมิ

เวลาที่ (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	
	กรณีไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง	กรณีมีการใช้คลื่นเหนือเสียง
0	31	31
15	33	33
30	35	35
45	36.5	36.5
60	37.5	37.5
75	38.5	38.5
90	39	39
105	39.5	39.5
120	39.5	40
135	40	40
150	40	40
165	40	40.5
180	40.5	40.5

สภาวะการทดลอง : ความเข้มข้นของสายป้อน 5 กรัมต่อลิตร, ความดันคร่อมเยื่อแผ่น 0.35 บาร์

ความเร็วรอบในการหมุน 5 รอบต่อนาที, ความเข้มของคลื่นเหนือเสียง 3.09
วัตต์ต่อตร.ซม.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ซ

การคำนวณจุดคุ้มทุน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การคำนวณจุดคุ้มทุน

สมมติ: ราคาขายผลิตภัณฑ์เท่ากับ 70 บาทต่อลิตร

กรณีไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง กำลังการผลิต 180 ลบ.ซม.ต่อชม.

กรณีมีการใช้คลื่นเหนือเสียงและไม่หมุนเยื่อแผ่น กำลังการผลิต 540 ลบ.ซม.ต่อชม.

กรณีมีการใช้คลื่นเหนือเสียงและหมุนเยื่อแผ่น กำลังการผลิต 900 ลบ.ซม.ต่อชม.

กรณีไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง

$$\begin{array}{rcl}
 \text{ต้นทุน} + & \text{ค่าปฏิบัติการ} & = & \text{รายได้} \\
 15,000 + & [0.37 \times 4 \times t] + [10 \times t] & = & 180 \times 70 \times t / 1000 \\
 & t & = & 13,392 \text{ ชั่วโมง}
 \end{array}$$

กรณีมีการใช้คลื่นเหนือเสียงและไม่หมุนเยื่อแผ่น

$$\begin{array}{rcl}
 \text{ต้นทุน} + & \text{ค่าปฏิบัติการ} & = & \text{รายได้} \\
 30,740 + & [(0.37 + 0.04 \times 2) \times 4 \times t/3] + [10 \times t] & = & 540 \times 70 \times t / 1000 \\
 & t & = & 1,130 \text{ ชั่วโมง}
 \end{array}$$

กรณีมีการใช้คลื่นเหนือเสียงและหมุนเยื่อแผ่น

$$\begin{array}{rcl}
 \text{ต้นทุน} + & \text{ค่าปฏิบัติการ} & = & \text{รายได้} \\
 31,740 + & [(0.37 + 0.035 \times 2) \times 4 \times t/5] + [10 \times t] & = & 900 \times 70 \times t / 1000 \\
 & t & = & 602 \text{ ชั่วโมง}
 \end{array}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ซ

ข้อมูลการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

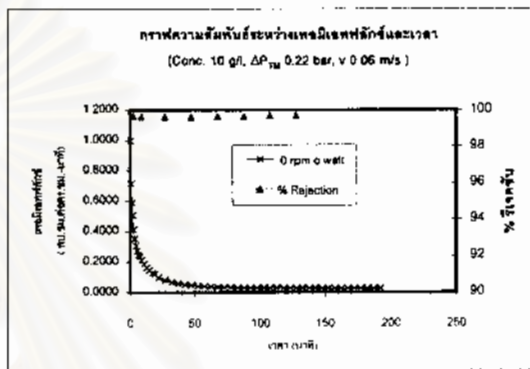
วันที่ 8/7/43
 การทดลองที่ 48

ความเค็มของเกลือ	0.22	บาร์	จำนวนการสั่นของ	0	ตัว
ความเค็มของดิน	0.08	เมตรต่อวินาที	การสั่นของเครื่อง	0	วินาที
ความเข้มข้น	10	กรัมต่อลิตร	ค่าสัมประสิทธิ์ของ	0	กรัม
ความหนาแน่น	0	กรัมต่อลิตร			

ค่าความต้านทานการไหล

permeate pure water (membrane)	2.15	m/s	$R_m =$	$1.3495E+09$	1/cm	
permeate pure water (membrane+fouling+cake)	0.050	m/s	$R_f =$	$5.6027E+10$	1/cm	$R_f = 5.6775E+10$ 1/cm
permeate pure water (membrane+fouling)	2.32	m/s	$R_m + R_f =$	$1.2524E+09$	1/cm	$R_p = -9.7084E+07$ 1/cm

ถังเวลา (min)	เวลาที่	ปริมาตร (ml)	เกลือที่เหลือ (cm ³ cm ² min)	ค่าจากสเปกโตร	ความเข้มข้นเกลือ (g/l)	พรีเซน
0.5	0.25	51	1.0000			
1	0.75	38.5	0.7157			
1.5	1.25	30	0.5882			
2	1.75	28	0.5098			
3	2.5	42	0.4118	0.035	0.029	99.706
4	3.5	38	0.3529			
5	4.5	31.5	0.3068			
8	5.5	28	0.2745			
7	6.5	25.6	0.2500			
8	7.5	24	0.2353			
10	9	43	0.2108	0.04	0.034	99.884
12	11	38	0.1883			
14	13	34	0.1667			
16	15	30	0.1471			
19	17.5	39	0.1275			
20	19.5	12.5	0.1225			
25	22.5	60	0.0980			
30	27.5	41	0.0804	0.043	0.036	99.639
35	32.5	34.5	0.0676			
40	37.5	30	0.0588			
45	42.5	28	0.0510			
50	47.5	24	0.0471	0.044	0.037	99.831
55	52.5	22	0.0431			
60	57.5	20.5	0.0402			
65	62.5	19.5	0.0382			
70	67.5	18.5	0.0363	0.037	0.031	99.690
75	72.5	17.5	0.0343			
80	77.5	17	0.0333			
85	82.5	16.5	0.0324			
90	87.5	16	0.0314	0.04	0.034	99.664
96	92.5	15.75	0.0309			
100	97.5	15.5	0.0304			
105	102.5	15.5	0.0304			
110	107.5	15	0.0294	0.034	0.029	99.715
115	112.5	15	0.0294			
121	118	18	0.0294			
125	123	12	0.0294			
130	127.5	14.75	0.0289	0.034	0.029	99.715
135	132.5	14.75	0.0289			
140	137.5	14.75	0.0289			
145	142.5	14.75	0.0289			
150	147.5	14.5	0.0284			
155	152.5	14.5	0.0284			
160	157.5	14.25	0.0279			
165	162.5	14	0.0275			
170	167.5	14	0.0275			
175	172.5	14	0.0275			
180	177.5	13.75	0.0270			
185	182.5	13.75	0.0270			
190	187.5	13.75	0.0270			
195	192.5	13.75	0.0270			



สถาบันวิทยบริการ
 วิทยาลัยเทคโนโลยีมหาวิทยาลัย

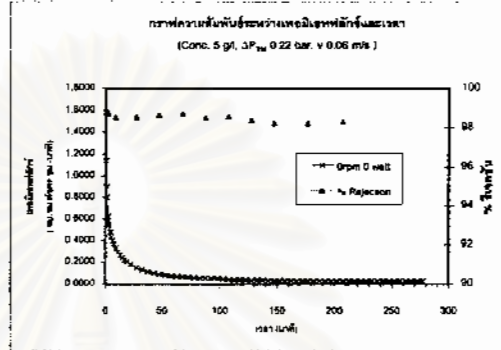
วันที่ 27/7/23
 หมายเลข 50

ความดันเครื่องสูบลม	0.22 บาร์	จำนวนการทดสอบ	0 ครั้ง
ความยาวท่อเชื่อม	0.06 เมตรต่อหัว	ความดันเครื่องสูบลม	0 บาร์
ความดันเครื่องสูบลม	0 บาร์ต่อหัว	ค่าคงที่เครื่องสูบลม	0 บาร์
ความยาวท่อเชื่อม	0 เมตรต่อหัว		

ค่าพารามิเตอร์การทดสอบ

permeate pure water (membrane)	3.36	m/s	$R_m =$	$8.5754E-06$	1/cm		
permeate pure water (membrane+housing+case)	0.06	m/s	$R_m =$	$6.5155E+10$	1/cm	$R_m =$	$5.5305E+10$
permeate pure water (membrane+housing)	3.42	m/s	$R_m + R_m =$	$8.4918E+06$	1/cm	$R_m =$	$-8.3662E+06$

จำนวนรอบ (min)	เวลาที่ (min)	ปริมาตร (ml)	เวลาที่เฉลี่ย (min)	ค่าคงที่เครื่องสูบลม	ความดันเครื่องสูบลม (bar)	น้ำที่ผลิต (ml)
0.5	0.25	51	1.5882			
1	0.75	58	1.1373			
1.5	1.25	46	0.8020			
2	1.75	41	0.8038			
2.5	2.25	30	0.5992			
3	2.75	32	0.6275	0.074	0.062	98.758
4	3.5	55.5	0.6441			
5	4.5	49	0.4804			
6	5.5	44	0.4314			
7	6.5	43	0.4020			
8	7.5	38	0.3725			
10	9	57.5	0.3309	0.067	0.073	98.540
12	11	50	0.2941			
14	13	54.5	0.2672			
18	15	49.5	0.2426			
18	17	45.5	0.2230			
20	19	42	0.2059			
25	22.5	51.5	0.1794			
30	27.5	77	0.1510	0.066	0.072	98.557
35	32.5	57	0.1314			
40	37.5	58	0.1137			
45	42.5	50.5	0.0990			
50	47.5	48.5	0.0912	0.079	0.066	98.674
55	52.5	42	0.0824			
60	57.5	35	0.0745			
65	62.5	36	0.0706			
70	67.5	34	0.0667	0.075	0.063	98.742
75	72.5	32	0.0627			
80	77.5	30.5	0.0698			
85	82.5	29	0.0669			
90	87.5	28	0.0648	0.067	0.073	98.540
95	92.5	26.5	0.0620			
100	97.5	25	0.0490			
105	102.5	24	0.0471			
110	107.5	22	0.0451	0.085	0.074	98.574
115	112.5	21.75	0.0426			
120	117.5	21	0.0412			
125	122.5	20.75	0.0407			
130	127.5	20	0.0392	0.090	0.081	98.369
135	132.5	19.5	0.0382			
140	137.5	19	0.0373			
145	142.5	18.5	0.0363			
150	147.5	18	0.0353	0.105	0.068	98.238
155	152.5	17.5	0.0343			
160	157.5	17.5	0.0343			
165	162.5	17.5	0.0343			
170	167.5	17.25	0.0338			
175	172.5	17.25	0.0338			
180	177.5	17	0.0333	0.105	0.068	98.238
185	182.5	16.5	0.0324			
190	187.5	16.25	0.0319			
195	192.5	16.25	0.0318			
200	197.5	16	0.0314			
205	202.5	16	0.0314			
210	207.5	16	0.0314	0.1	0.064	98.322
215	212.5	16	0.0314			
220	217.5	15.75	0.0309			
225	222.5	15.5	0.0304			
230	227.5	15.5	0.0304			
235	232.5	15.5	0.0304			
240	237.5	15	0.0294			
245	242.5	15	0.0294			
250	247.5	15	0.0294			
255	252.5	14.75	0.0289			
260	257.5	14.75	0.0289			
265	262.5	14.75	0.0289			
270	267.5	14.5	0.0284			
275	272.5	14.5	0.0284			
280	277.5	14.75	0.0280			



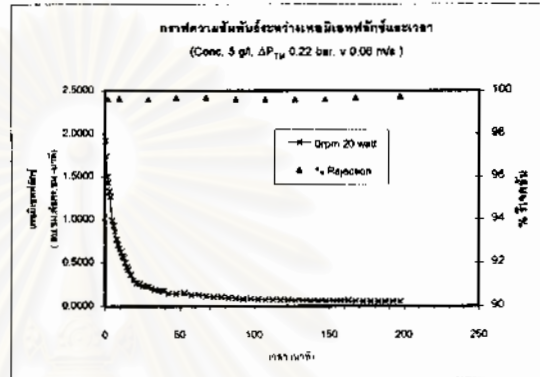
วิทยาลัยการศึกษานานาชาติ
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

วันที่ 7/7/43
 ภาพหน้า 51

ความหนาแน่นของเมมเบรน	0.22	นาฟ	จำนวนหน่วยเมมเบรน	1	ตัว
ความยาวของเมมเบรน	0.06	เมตร	ความดันคั้นของเมมเบรน	28	บาร์
ความดันของเมมเบรน	5	บาร์	ความดันคั้นของเมมเบรน	20	บาร์
ความยาวของท่อ	0	เมตร			

ค่าความต้านทานการกรอง
 permeate pure water (membrane) 3.40 m/s $R_m = 6.5334E-08$ 1/cm
 permeate pure water (membrane + fouling + cake) 0.10 m/s $R_f = 3.0014E+10$ 1/cm $R_c = 2.9042E+10$ 1/cm
 permeate pure water (membrane + fouling) 2.98 m/s $R_f + R_m = 9.7252E+08$ 1/cm $R_c = 1.1919E+08$ 1/cm

ช่วงเวลา (วินาที)	เวลาที่ (วินาที)	ปริมาตร (ml)	ความดันของเมมเบรน (cm3/cm2*วินาที)	ค่าความดันของเมมเบรน	ความดันคั้นของเมมเบรน	% รีเจนเนอเรชัน
0.5	0.25	98	1.9219			
1	0.75	89	1.7451			
15	1.25	77	1.5098			
2	1.75	76.5	1.5000	0.023	0.019	99.814
25	2.25	73	1.4314			
3	2.75	68	1.3330			
4	3.5	129	1.2847			
5	4.5	101	0.9902			
6	5.5	95	0.8314			
7	6.5	88	0.8627			
8	7.5	79	0.7745			
9	8.5	72.5	0.7108			
10	9.5	68.5	0.6716	0.022	0.018	99.631
11	10.5	64	0.6275			
12	11.5	59	0.5784			
13	12.5	57	0.5588			
14	13.5	51.5	0.5049			
15	14.5	46.5	0.4569			
16	15.5	43.5	0.4295			
18	17	74	0.3827			
20	19	62	0.3039			
22	21	54.5	0.2672			
24	23	53	0.2598			
26	25	49	0.2402			
28	27	46.5	0.2279			
30	29	46	0.2255	0.024	0.020	99.597
32	31	43	0.2108			
34	33	38.5	0.1897			
36	35	36	0.1765			
38	37	37	0.1814			
40	39	36	0.1765			
45	42.5	77	0.1510			
50	47.5	74	0.1451	0.018	0.016	99.681
55	52.5	76	0.1490			
60	57.5	67	0.1314			
65	62.5	66	0.1294			
70	67.5	59	0.1167	0.019	0.016	99.861
75	72.5	53	0.1039			
80	77.5	52.5	0.1029			
85	82.5	49	0.0901			
90	87.5	46	0.0802	0.023	0.019	99.814
95	92.5	42	0.0824			
100	97.5	43	0.0843			
105	102.5	40	0.0794			
110	107.5	38	0.0745	0.023	0.019	99.614
115	112.5	37.5	0.0736			
120	117.5	37.5	0.0736			
125	122.5	36.5	0.0716			
130	127.5	35	0.0686	0.023	0.019	99.814
135	132.5	34	0.0667			
140	137.5	34	0.0667			
145	142.5	33	0.0647			
150	147.5	32.5	0.0637	0.023	0.019	99.814
155	152.5	32	0.0627			
160	157.5	32	0.0627			
165	162.5	31.5	0.0616			
170	167.5	30	0.0589	0.02	0.017	99.864
175	172.5	29	0.0569			
180	177.5	29	0.0569			
185	182.5	29	0.0569			
190	187.5	29	0.0569			
195	192.5	29	0.0569			
200	197.5	29	0.0569	0.015	0.013	99.746



สงวนลิขสิทธิ์
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

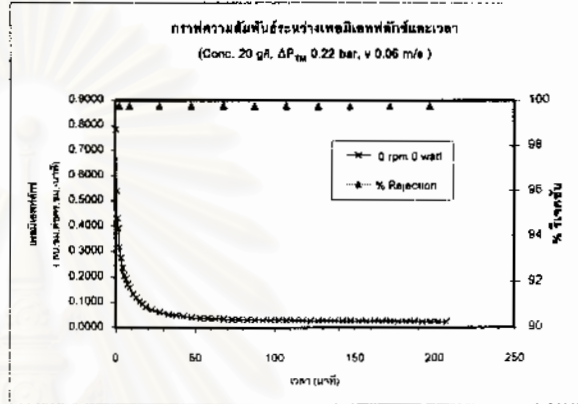
วันที่ 10/7/43
 การทดลองที่ 52

ชื่อพารามิเตอร์	หน่วย	ค่าเริ่มต้น	ค่าปัจจุบัน
ความดันคร่อมเยื่อ	0.22 บาร์	จำนวนการดีดเยื่อ	0 ครั้ง
ความเร็วไหลย้อน	0.06 เมตรต่อวินาที	ความดันคั่นเหนือถัง	0 กิโลกรัม
ความเข้มข้น	20 กรัมต่อลิตร	ค่าตั้งคั่นเหนือถัง	0 ลิตร
ความเร็วรอบหมุน	0 รอบต่อนาที		

ค่าความดันคร่อมการทดลอง

permeate pure water (membrane)	2.20 ml/s	$R_m =$	$1.3188E+08$ 1/cm	$R_s =$	$6.8283E+10$ 1/cm
permeate pure water (membrane+fouling+cake)	0.04 ml/s	$R_f =$	$6.9633E+10$ 1/cm		
permeate pure water (membrane+fouling)	2.15 ml/s	$R_p + R_m =$	$1.3495E+08$ 1/cm	$R_p =$	$3.0670E+07$ 1/cm

ช่วงเวลา (min)	เวลาที่	ปริมาณ(ml)	เกลือที่สกัดได้ (mg/ml ² /min)	ค่าจากกราฟไดโตร	ความเข้มข้นเกลือ(μg/l)	ประสิทธิภาพ (%)
0.5	0.25	40	0.7843			
1	0.75	27.5	0.5382			
1.5	1.25	22	0.4314			
2	1.75	20	0.3922			
3	2.5	32.5	0.3188	0.058	0.049	99.757
4	3.5	28	0.2746			
5	4.5	24	0.2353			
6	5.5	21	0.2089			
7	6.5	19.5	0.1912			
8	7.5	17.5	0.1718			
10	9	32	0.1589	0.061	0.051	99.744
12	11	27	0.1324			
14	13	24	0.1176			
16	15	20.5	0.1005			
18	17	19	0.0931			
20	19	16.5	0.0809			
25	22.5	36	0.0706			
30	27.5	31	0.0606	0.06	0.060	99.748
36	33	31.5	0.0515			
40	38	20	0.0490			
45	42.5	23	0.0451			
50	47.5	20.5	0.0402	0.055	0.046	99.769
56	53	23	0.0378			
60	58	14.5	0.0365			
65	62.5	17.6	0.0343			
71	68	20	0.0327	0.055	0.046	99.768
75	73	13	0.0318			
80	77.5	16	0.0314			
85	82.5	15.5	0.0304			
90	87.5	15.5	0.0304	0.057	0.048	99.761
95	92.5	15	0.0294			
100	97.5	15	0.0294			
105	102.5	15	0.0294			
110	107.5	14.5	0.0284	0.055	0.046	99.769
115	112.5	14.25	0.0279			
120	117.5	14.25	0.0279			
125	122.5	14	0.0275			
130	127.5	14	0.0275	0.059	0.050	99.762
135	132.5	13.5	0.0286			
140	137.5	13.5	0.0285			
145	142.5	13.5	0.0285			
150	147.5	13.5	0.0285	0.058	0.049	99.767
155	152.5	13	0.0255			
160	157.5	13	0.0255			
165	162.5	12.75	0.0250			
170	167.5	12.75	0.0250			
175	172.5	12.75	0.0250	0.058	0.049	99.757
180	177.5	12.5	0.0245			
185	182.5	12.25	0.0240			
190	187.5	12.25	0.0240			
195	192.5	12	0.0235			
200	197.5	12	0.0235	0.057	0.048	99.761
205	202.5	12	0.0235			
210	207.5	12	0.0235			



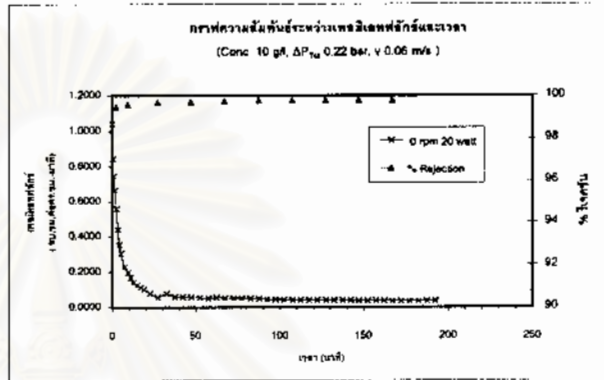
วันที่ 10/7/43
การทดลองที่ 53

ความเข้มข้นเริ่มต้น	0.22	หน่วย	จำนวนหน่วยปริมาตร	1	ค่า
ความเข้มข้น	0.06	หน่วยปริมาตร	ความดันในหน่วยบาร์	20	ลิตร/ชั่วโมง
ความเข้มข้น	20	กิโลกรัม/ลิตร	ค่าสัมประสิทธิ์การไหล	20	ลิตร
ความเข้มข้น	0	หน่วยปริมาตร			

ค่าความต้านทานการไหล

permeate pure water (membrane)	2.27	ml/s	$R_m =$	$1.2800E+09$	1/cm	$R_f =$	$4.669E+10$	1/cm
permeate pure water (membrane-fouling-cake)	0.06	ml/s	$R_c =$	$4.8356E+10$	1/cm	$R_{f,c} =$	$3.7791E+08$	1/cm
permeate pure water (membrane-fouling)	1.75	ml/s	$R_m + R_c =$	$1.8579E+09$	1/cm			

ช่วงเวลา (min)	เวลาที่	ปริมาณที่ไหล	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)	ค่าจากสมการ	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)	พิกัด
0.5	0.25	53	1.0392			
1	0.75	43	0.8431			
1.5	1.25	38	0.7451			
2	1.75	34	0.6667			
3	2.5	57	0.5588	0.124	0.104	99.480
4	3.5	45	0.4412			
5	4.5	38	0.3529			
6	5.5	31	0.3039			
9	7.5	70	0.2268			
10	9.5	20	0.1901	0.101	0.085	99.576
12	11	34	0.1687			
14	13	29	0.1422			
15	15	25.5	0.1250			
16	17	23	0.1127			
20	19	20.5	0.1005			
25	22.5	40	0.0784			
30	27.5	20	0.0569	0.075	0.063	99.585
35	32.5	39	0.0765			
40	37.5	30	0.0588			
45	42.5	30	0.0588			
50	47.5	29	0.0569	0.067	0.066	99.719
56	52.5	28	0.0649			
60	57.5	26	0.0510			
65	62.5	28	0.0649			
70	67.5	27	0.0529	0.06	0.050	99.748
75	72.5	27	0.0529			
80	77.5	27	0.0629			
85	82.5	26	0.0619			
90	87.5	25	0.0480	0.053	0.044	99.778
95	92.5	23.5	0.0461			
100	97.5	22.5	0.0441			
105	102.5	22	0.0431			
110	107.5	21.25	0.0417	0.054	0.045	99.773
115	112.5	20.75	0.0407			
120	117.5	20.5	0.0402			
125	122.5	20.5	0.0402			
130	127.5	20.5	0.0402	0.052	0.044	99.782
135	132.5	20	0.0392			
140	137.5	20	0.0392			
145	142.5	19.5	0.0382			
150	147.5	19	0.0373	0.051	0.043	99.796
155	152.5	18.5	0.0363			
160	157.5	18.5	0.0363			
165	162.5	18.5	0.0363			
170	167.5	17.5	0.0343	0.049	0.041	99.794
175	172.5	18	0.0353			
180	177.5	17.5	0.0343			
185	182.5	18	0.0353			
190	187.5	18	0.0353			
195	192.5	18	0.0353			



วิทยาลัยบริการ
สงครณมหาวิทยาลัย

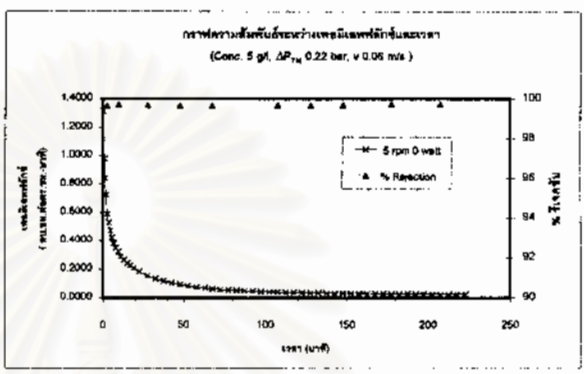
วันที่ 12/7/43
 ตารางผล 54

ความดันหน้าเมมเบรน	0.22 บาร์	จำนวนรอบล้างเมมเบรน	0 ครั้ง
ความดันย้อน	0.06 เมกกะปาสกาล	ความเข้มข้นเกลือ	0 มิลลิกรัม
ความเร็วหมุน	5 รอบต่อนาที	ค่าความดันย้อน	0 บาร์
ความหนาเมมเบรน	5 ไมครอน		

ค่าความต้านทานการไหล

permeate pure water (membrane)	2.45 ml/s	$R_m =$	$1.1842E-06$ 1/cm		
permeate pure water (membrane+fouling+cake)	0.04 ml/s	$R_f =$	$4.5691E+10$ 1/cm	$R_c =$	$6.4603E+10$ 1/cm
permeate pure water (membrane+fouling)	2.67 ml/s	$R_{f,c} =$	$1.0680E+08$ 1/cm	$R_m =$	$-8.6219E+07$ 1/cm

ช่วงเวลา (min)	เวลาที่	ปริมาณผลิต	แรงดันหน้าเมมเบรน (bar)	ค่าความดันย้อน	ความเข้มข้นเกลือ (ppm)	ผลิตจริง
0.5	0.25	67	1.1317			
1	0.75	50	0.6804			
1.5	1.25	43	0.8431			
2	1.75	37	0.7255			
3	2.5	60	0.5882	0.02	0.017	99.664
4	3.5	54	0.5294			
5	4.5	46	0.4706			
6	5.5	43	0.4218			
7	6.5	39	0.3824			
8	8	71	0.3480			
10	9.5	33	0.3235	0.017	0.014	99.715
12	11	59	0.2892			
14	13	54	0.2547			
16	15	49	0.2402			
18	17	46	0.2255			
20	19	42.5	0.2083			
25	22.5	93	0.1824			
30	27.5	79.5	0.1569	0.018	0.016	99.696
35	32.5	68	0.1333			
40	37.5	60	0.1178			
45	42.5	53	0.1009			
50	47.5	47.5	0.0931	0.02	0.017	99.664
55	52.5	42.5	0.0833			
61	58	45	0.0735			
65	63	28	0.0688			
70	67.5	32	0.0627	0.02	0.017	99.664
75	72.5	30	0.0568			
80	77.5	28	0.0648			
85	82.5	26.5	0.0520			
90	87.5	25	0.0490			
95	92.5	23.5	0.0461			
100	97.5	22	0.0431			
105	102.5	21.5	0.0422			
110	107.5	20.5	0.0402	0.018	0.016	99.661
115	112.5	20	0.0392			
120	117.5	19	0.0379			
125	122.5	18.5	0.0363			
130	127.5	17.5	0.0343	0.02	0.017	99.664
135	132.5	17.5	0.0343			
140	137.5	17	0.0333			
145	142.5	16.5	0.0324			
150	147.5	16	0.0314	0.018	0.015	99.668
155	152.5	15.5	0.0304			
160	157.5	15.5	0.0304			
165	162.5	16	0.0294			
170	167.5	14.75	0.0289			
175	172.5	14.5	0.0284			
180	177.5	14	0.0275	0.018	0.013	99.732
185	182.5	14	0.0275			
190	187.5	13.5	0.0265			
195	192.5	13.5	0.0265			
200	197.5	13.25	0.0260			
205	202.5	13	0.0255			
210	207.5	13	0.0256	0.015	0.013	99.748
215	212.5	13	0.0255			
220	217.5	13	0.0256			
225	222.5	13	0.0255			



สถาบันวิทยบริการ
 วิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ความเข้มข้นเริ่มต้น	0.22	mg/l	จำนวนหน่วยความดัน	0	kg
ความเข้มข้นตอน	0.06	mg/l	ความดันหน่วยความดัน	0	kg
ความเข้มข้น	5	mg/l	ความดันหน่วยความดัน	0	kg
ความเข้มข้น	20	mg/l	ความดันหน่วยความดัน		

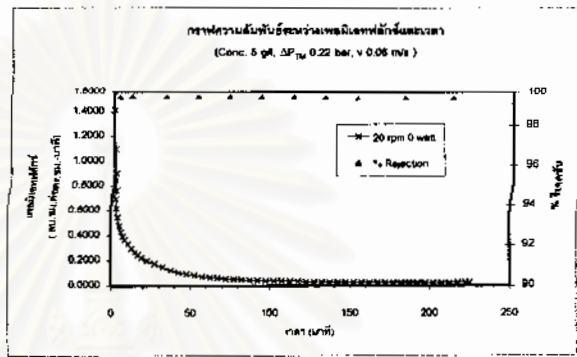
ค่าพารามิเตอร์การกรอง

permeate pure water (membrane) 2.96 ml/s $R_m = 9.5251E+06$ 1/cm

permeate pure water (membrane+ fouling- calc) 0.04 ml/s $R_m = 6.6954E+10$ 1/cm $R_f = 6.6093E+10$ 1/cm

permeate pure water (membrane+ fouling) 3.37 ml/s $R_m + R_f = 8.6170E+08$ 1/cm $R_f = -1.2112E+08$ 1/cm

ช่วงเวลา (นาที)	เวลาที่	ปริมาณน้ำ (ลิตร)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/l)	ค่าจากสมการ	ความเข้มข้นตอน (mg/l)	ประสิทธิภาพ (%)
0.5	0.25	72	1.4118			
1	0.75	56	1.0900			
1.5	1.25	46	0.9020			
2	1.75	39	0.7847			
2.5	2.5	35.5	0.6651			
3	3.5	31.5	0.6178	0.023	0.019	99.814
4	4.5	58	0.5490			
5	5.5	49	0.4804			
6	6.5	44	0.4374			
7	7.5	40	0.3922			
8	9	37.5	0.3678			
10	11	87.5	0.3308	0.018	0.015	99.898
12	13	80	0.2941			
14	15	54.5	0.2672			
16	17	50	0.2451			
18	19	45	0.2208			
20	22.5	41	0.2010			
25	27.5	89	0.1745			
30	32.5	74.5	0.1481	0.02	0.017	99.864
35	37.5	62.5	0.1225			
40	42.5	54	0.1059			
45	47.5	47	0.9922			
50	52.5	42	0.0624	0.02	0.017	99.864
55	57.5	37	0.0725			
60	62.5	34	0.0667			
65	67.5	31.5	0.0618			
70	72.5	29	0.0569	0.02	0.017	99.881
75	77.5	27	0.0529			
80	82.5	25	0.0490			
85	87.5	24	0.0471			
90	92.5	22.5	0.0441	0.02	0.017	99.864
95	97.5	21	0.0412			
100	102.5	20	0.0392			
105	107.5	19.5	0.0382			
110	112.5	18.5	0.0363	0.02	0.017	99.864
115	117.5	18	0.0353			
120	122.5	17.5	0.0343			
125	127.5	17	0.0333			
130	132.5	16.5	0.0324	0.024	0.020	99.897
135	137.5	16	0.0314			
140	142.5	15.75	0.0309			
145	147.5	15.5	0.0304			
150	152.5	15.25	0.0299	0.027	0.023	99.847
155	157.5	15	0.0294			
160	162.5	14.5	0.0284			
165	167.5	14.5	0.0284			
170	172.5	14.5	0.0284			
175	177.5	14	0.0278			
180	182.5	14	0.0275	0.026	0.022	99.864
185	187.5	13.75	0.0270			
190	192.5	13.75	0.0270			
195	197.5	13.5	0.0265			
200	202.5	13.5	0.0266			
205	207.5	13	0.0256			
210	212.5	13	0.0256	0.025	0.021	99.861
215	217.5	13	0.0256			
220	222.5	13	0.0256			
225	225	13	0.0255			



สำนักงานวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

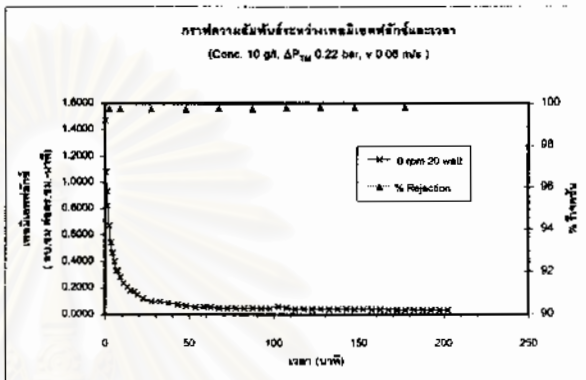
วันที่ 19/7/43
 ภาพประกอบ 80

ความหนาของเยื่อ	0.22 มม.	จำนวนเยื่อ	1	ตัว
ความยาวของเยื่อ	0.06 เมตร/หน่วย	ความดันที่เยื่อ	26	บาร์
ความยาวเส้น	10 กิโลเมตร	ค่าความเข้มข้น	20	กรัม
ความยาวรวม	0 เมตร			

ค่าความต้านทานการไหล

permeate pure water (membrane)	2.98 ml/s	$R_m =$	$9.7252E+08$ 1/cm	
permeate pure water (membrane + fouling + scale)	0.06 ml/s	$R_f =$	$4.7894E+10$ 1/cm	$R_t = 4.8826E+10$ 1/cm
permeate pure water (membrane + fouling)	2.72 ml/s	$R_p + R_m =$	$1.0980E+09$ 1/cm	$R_p = 9.5462E+07$ 1/cm

ช่วงเวลา (min)	เวลาที่	ปริมาณ (ml)	แรงดันที่เยื่อ (atm/cm ² /min)	ค่าความเข้มข้น	ความเข้มข้นเฉลี่ย (mg/l)	ร้อยละ
0.5	0.25	75	1.4706			
1	0.75	55	1.0784			
1.5	1.25	47.5	0.9314			
2	1.75	42	0.8235			
3	2.5	68.5	0.6718	0.033	0.028	99.723
4	3.5	55.5	0.5441			
5	4.5	47.5	0.4657			
6	5.5	41	0.4020			
7	6.5	34	0.3333			
8	7.5	34	0.3333			
10	9	57.5	0.2819	0.032	0.027	99.732
12	11	48	0.2353			
14	13	43	0.2108			
15	15	37	0.1814			
16	17	35.5	0.1740			
20	19	31	0.1520			
25	22.5	51	0.1198			
30	27.5	50.5	0.0990	0.033	0.028	99.723
35	32.5	50	0.0960			
40	37.5	45	0.0882			
45	43	46.5	0.0780			
50	48	27	0.0682	0.033	0.028	99.723
57	53.5	40	0.0560			
60	58.5	18	0.0568			
65	62.5	28.5	0.0558			
70	67.5	25.5	0.0600	0.031	0.026	99.740
75	72.5	25.5	0.0500			
80	77.5	25	0.0480			
85	82.5	24	0.0471			
90	87.5	23.5	0.0481	0.031	0.026	99.740
95	92.5	22.5	0.0441			
100	97.5	22	0.0431			
105	102.5	31	0.0608			
110	107.5	25	0.0490	0.027	0.023	99.773
115	112.5	21.5	0.0422			
120	117.5	21	0.0412			
125	122.5	20.5	0.0402			
130	127.5	21	0.0412	0.024	0.020	99.799
135	132.5	20.25	0.0397			
140	137.5	20.25	0.0397			
145	142.5	20	0.0392			
150	147.5	19.5	0.0382	0.024	0.020	99.799
155	152.5	19.5	0.0382			
160	157.5	19	0.0373			
165	162.5	19	0.0373			
170	167.5	18.5	0.0363			
175	172.5	18	0.0353			
180	177.5	18	0.0353	0.025	0.021	99.790
185	182.5	17.5	0.0343			
190	187.5	17.5	0.0343			
195	192.5	17.5	0.0343			
200	197.5	17.5	0.0343			
205	202.5	17.5	0.0343			



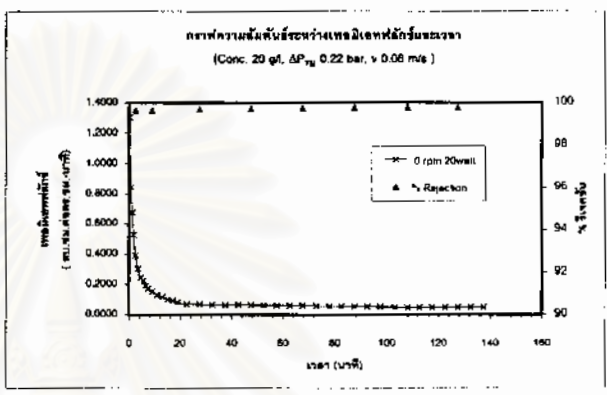
วันที่ 20/7/43
 รหัสงาน 67

ความดันกรองเฉลี่ย	0.22 บาร์	จำนวนรอบล้าง	1 ครั้ง
ความเร็วกรอง	0.06 เมตร/วินาที	ความถี่ล้าง	20 ครั้ง/ชั่วโมง
ความเข้มข้น	20 กรัม/ลิตร	กำลังดันป้อน	20 บาร์
ความยาวท่อ	0 เมตร/ชั่วโมง		

ค่าความต้านทานการไหล

permeate pure water (membrane)	2.95 m/s	R_{m1}	$9.6351E+08$ 1/cm		
permeate pure water (membrane+fouling+scale)	0.12 m/s	R_{m2}	$2.4178E+10$ 1/cm	$R_1 =$	$2.3148E+10$ 1/cm
permeate pure water (membrane+fouling)	2.82 m/s	$R_{m1} + R_{m2}$	$1.0301E+08$ 1/cm	$R_2 =$	$4.6567E+07$ 1/cm

ช่วงเวลา (ชม)	เวลาที่	ปริมาณกรอง (cm ³)	ความเข้มข้น (mg/cm ³)	ค่าจากสมการ	ความเข้มข้นเฉลี่ย (g/l)	ร้อยละ
0.5	0.25	66.5	1.3039			
1	0.75	43	0.8431			
1.5	1.25	34.5	0.6785			
2	1.75	27	0.5294			
3	2.5	40	0.3822	0.070	0.068	99.999
4	3.5	31	0.3039			
5	4.5	25	0.2451			
6	5.5	20	0.2255			
7	6.5	19.5	0.1912			
8	7.5	17.5	0.1716			
10	9	31	0.1520	0.082	0.068	99.958
12	11	28.5	0.1298			
14	13	24	0.1176			
16	15	20.5	0.1005			
18	17	19	0.0931			
20	19	17	0.0833			
26	22.5	35	0.0886			
30	27.5	35	0.0886	0.074	0.062	99.890
36	32.5	34	0.0667			
40	37.5	32	0.0627			
45	42.5	34	0.0867			
50	47.5	33	0.0647	0.066	0.055	99.723
55	52.5	32	0.0627			
60	57.5	31	0.0606			
65	62.5	30.5	0.0586			
70	67.5	30	0.0586	0.061	0.051	99.744
76	73	35	0.0572			
80	78	22.5	0.0551			
85	82.5	28	0.0549			
90	87.5	27.5	0.0539	0.058	0.047	99.766
95	92.5	27	0.0529			
100	97.5	26	0.0510			
106	103	30	0.0490			
110	108	19.5	0.0478	0.053	0.044	99.778
115	112.5	25	0.0459			
120	117.5	25	0.0490			
125	122.5	25	0.0490			
130	127.5	24.5	0.0480	0.054	0.045	99.773
135	132.5	25	0.0490			
140	137.5	25	0.0490			



สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

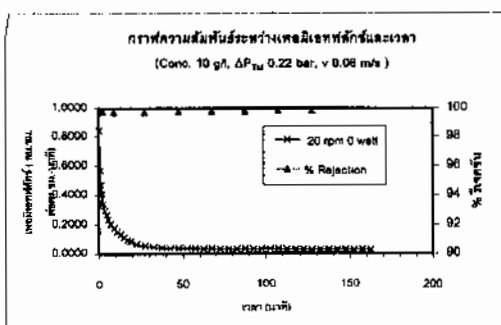
วันที่ 21/8/43

การทดลองที่	08	
ความเค็มของน้ำดิบ	0.22 นาท	จำนวนการเดินเครื่อง
ความเข้มข้นของ	0.05 เมกดาลินาท	ความเค็มของน้ำดิบ
ความเข้มข้น	20 กิ่งต่อลิตร	ค่าคงที่ในหนังสือ
ความเข้มข้น	20 รบต่อลิตร	

ค่าความต้านทานของ

permeate pure water (membrane)	2.00 m/s	$R_m =$	1.4507E+09 1/cm	
permeate pure water (membrane+fouling+calc)	0.06 m/s	$R_f =$	5.8027E+10 1/cm	$R_f =$ 5.8600E+10 1/cm
permeate pure water (membrane+fouling)	1.90 m/s	$R_p + R_m =$	1.6270E+09 1/cm	$R_p =$ 7.8352E+07 1/cm

ช่วงเวลา (min)	นาฬิกา	ปริมาตร(ml)	เกลือโซเดียมคลอไรด์ (mg/20ml ² /min)	ค่าจากกราฟ	ความเข้มข้นเกลือ(%)	ร้อยละ
0.5	0.25	43	0.6431			
1	0.75	29	0.5686			
1.5	1.25	24	0.4706			
2	1.75	21	0.4116			
3	2.5	36	0.3431	0.087	0.048	99.761
4	3.5	30	0.2941			
5	4.5	27	0.2647			
6	5.5	24	0.2353			
8	7	41.5	0.2034			
10	9	36	0.1765	0.06	0.050	99.748
12	11	30.5	0.1495			
14	13	27	0.1324			
16	15	23	0.1127			
18	17	19	0.0931			
20	19	17	0.0833			
25	22.5	34	0.0667			
30	27.5	26	0.0549	0.058	0.049	99.757
35	32.6	23.6	0.0461			
40	37.5	21	0.0412			
45	42.5	19.5	0.0382			
50	47.5	19	0.0373	0.052	0.044	99.782
55	52.5	18	0.0353			
60	57.6	17.5	0.0343			
65	62.5	17.25	0.0338			
70	67.5	16.5	0.0324	0.046	0.039	99.807
75	72.5	16.25	0.0319			
80	77.6	16	0.0314			
85	82.5	16	0.0314			
90	87.5	16	0.0314	0.041	0.034	99.828
95	92.5	15.5	0.0304			
100	97.5	15.5	0.0304			
105	102.5	15.5	0.0304			
110	107.5	15.5	0.0304	0.038	0.032	99.841
115	112.6	15	0.0294			
120	117.5	15	0.0294			
125	122.5	14.5	0.0284			
130	127.5	14	0.0275	0.039	0.033	99.856
135	132.5	13.5	0.0265			
140	137.5	14	0.0275			
145	142.6	14	0.0275			
150	147.5	14	0.0275			
155	152.5	13.5	0.0265			
160	157.5	13.5	0.0265			
165	162.5	13.5	0.0265			



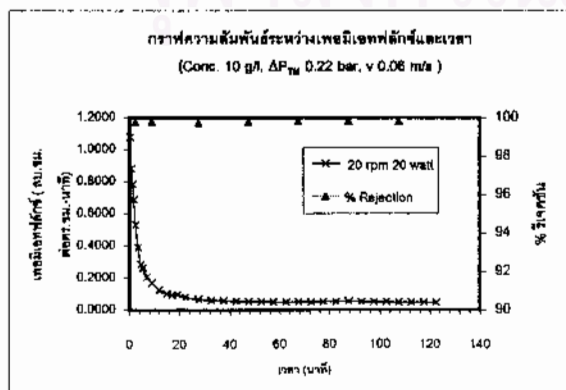
วันที่ 21/8/43
 การทดลองที่ 89

ความดันกึ่งต่อแผ่น	0.22 บาร์	จำนวนทรานส์เวิร์ท	1 ตัว
ความเร็วสายป้อน	0.06 เมตรต่อวินาที	ความถี่คลื่นเสียง	28 กิโลเฮิรตซ์
ความเข้มข้น	20 กรัมต่อลิตร	กำลังคลื่นเสียง	20 วัตต์
ความเร็วรอบหมุน	20 รอบต่อนาที		

คำนวณต้านทานการกรอง

permeate pure water (membrane)	2.17	ml/s	$R_m =$	1.3391E+09	1/cm	
permeate pure water (membrane+fouling+cake)	1.29	ml/s	$R_f =$	2.2462E+09	1/cm	$R_c =$ 5.2263E+08 1/cm
permeate pure water (membrane+fouling)	1.68	ml/s	$R_p + R_m =$	1.7236E+09	1/cm	$R_c =$ 3.8449E+08 1/cm

ช่วงเวลา (min)	เวลาที่ (min)	ปริมาตร(ml)	ฟลูกซ์ (cm ³ /cm ² ·min)	ค่าจากกราฟ	ความเข้มข้นฟลูกซ์ (g/l)	% รีเจกชัน
0.5	0.25	55	1.0784			
1	0.75	45	0.8824			
1.5	1.25	40	0.7843			
2	1.75	35	0.8863			
3	2.5	54	0.5294	0.053	0.044	99.778
4	3.5	40	0.3922			
5	4.5	29	0.2843			
8	5.5	27	0.2847			
8	7	42.5	0.2083			
10	9	35	0.1718	0.053	0.044	99.778
14	12	52	0.1275			
16	15	21	0.1029			
18	17	19.5	0.0956			
20	19	20	0.0980			
25	22.5	42.5	0.0833			
30	27.5	35	0.0686	0.081	0.051	99.744
35	32.5	32	0.0627			
40	37.5	30.5	0.0598			
45	42.5	29	0.0569			
50	47.5	28	0.0569	0.048	0.040	99.799
55	52.5	28	0.0549			
80	57.5	27	0.0529			
65	62.5	26	0.0510			
70	67.5	26	0.0510	0.04	0.034	99.832
75	72.5	26	0.0510			
80	77.5	27	0.0529			
85	82.5	27	0.0529			
90	87.5	28	0.0549	0.038	0.032	99.841
95	92.5	27	0.0529			
100	97.5	26	0.0510			
105	102.5	26	0.0510			
110	107.5	25	0.0490	0.038	0.032	99.841
115	112.5	25	0.0490			
120	117.5	25	0.0490			
125	122.5	25	0.0490			



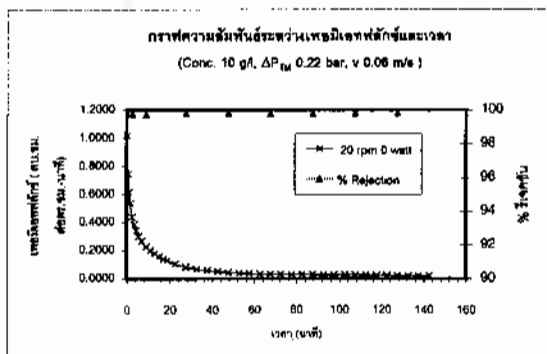
วันที่ 22/8/43
 ปีทดลองที่ 90

ความดันคั่นเยื่อเมมเบรน	0.22 บาร์	จำนวนการทดสอบ	1	ตัว
ความเร็วสายพาน	0.06 เมตรต่อวินาที	ความถี่คั่นเยื่อเมมเบรน	28	กิโลเมตร
ความเข้มข้น	10 กรัมต่อลิตร	ค่าคั่นคั่นเยื่อเมมเบรน	0	วินาที
ความเร็วรอบหมุน	20 รอบต่อนาที			

ค่าความต้านทานการกรอง

permeate pure water (membrane)	2.17	m/s	$R_{m,0}$	=	1.3391E+09	1/cm		
permeate pure water (membrane+fouling+cake)	0.04	m/s	R_f	=	6.9633E+10	1/cm	R_c	= 6.8648E+10 1/cm
permeate pure water (membrane+fouling)	2.95	m/s	$R_m+R_{f,0}$	=	9.8361E+08	1/cm	$R_{f,0}$	= -3.5568E+08 1/cm

ช่วงเวลา (min)	นาฬิกา	ปริมาตร(m)	เพอเมอเทต (cm ³ /cm ² /min)	ค่าจากสมการ	ความเข้มข้นเพอเมเตต (ppm)	% รีเจกชัน
0.5	0.25	52	1.0196			
1	0.75	38	0.7451			
1.5	1.25	31.5	0.6178			
2	1.75	27.5	0.5302			
3	2.5	45	0.4412	0.024	0.020	99.799
4	3.5	39.5	0.3873			
5	4.5	35	0.3431			
6	5.5	31	0.3039			
8	7	56	0.2896			
10	9	47	0.2304	0.03	0.025	99.748
12	11	41	0.2010			
14	13	37	0.1814			
16	15	32.5	0.1593			
18	17	29	0.1422			
20	19	26.5	0.1299			
25	22.5	54	0.1059			
30	27.5	43.5	0.0853	0.021	0.018	99.824
35	32.5	36	0.0706			
40	37.5	30	0.0588			
45	42.5	27	0.0529			
50	47.5	23	0.0451	0.021	0.018	99.824
55	52.5	21	0.0412			
60	57.5	20	0.0382			
65	62.5	18	0.0353			
70	67.5	17	0.0333	0.02	0.017	99.832
75	72.5	16.5	0.0324			
80	77.5	16	0.0314			
85	82.5	16	0.0314			
90	87.5	15	0.0294	0.02	0.017	99.832
95	92.5	14	0.0275			
100	97.5	14	0.0275			
105	102.5	13.5	0.0265			
110	107.5	13.5	0.0265	0.018	0.015	99.849
115	112.5	13	0.0255			
120	117.5	12.75	0.0250			
125	122.5	12.5	0.0245			
130	127.5	12	0.0235	0.017	0.014	99.857
135	132.5	12	0.0235			
140	137.5	12	0.0235			
145	142.5	12	0.0235			



วันที่ 22/04/3

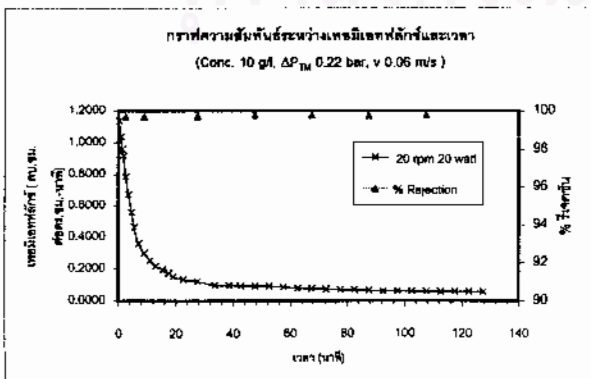
การทดลองที่ 91

ความดันคอมเพรสเซอร์	0.22 บาร์	จำนวนทรานส์ดิวเซอร์	1 ตัว
ความเร็วสายปั๊ม	0.06 เมตรต่อนาที	ความถี่ที่บันทึกข้อมูล	28 กิโลเฮิรตซ์
ความเข้มข้น	10 กรัมต่อลิตร	กำลังขับมอเตอร์	20 วัตต์
ความเร็วรอบหมุน	20 รอบต่อนาที		

ค่าความต้านทานการกรอง

permeate pure water (membrane)	2.17	m/s	$R_m =$	$1.3381E+08$	1/cm	
permeate pure water (membrane+fouling+cake)	0.15	m/s	$R_f =$	$1.8922E+10$	1/cm	$R_f = 1.6746E+10$ 1/cm
permeate pure water (membrane+fouling)	1.33	m/s	$R_f+R_m =$	$2.1760E+09$	1/cm	$R_f = 8.3693E+08$ 1/cm

ช่วงเวลา (min)	เวลาที่	ปริมาตร(ml)	ผลผลิตฟลักซ์ (cm ³ /cm ² /min)	ค่าจากอุปกรณ์	ความเข้มข้นเกลือตก (g/l)	% รีเจกชัน
0.5	0.25	58	1.1373			
1	0.75	53	1.0392			
1.5	1.25	49	0.9606			
2	1.75	47	0.9216			
3	2.5	80	0.7843	0.034	0.029	99.715
4	3.5	56.5	0.8718			
5	4.5	57	0.5588			
8	5.5	47.5	0.4657			
8	7	74	0.3627			
10	9	61.5	0.3015	0.034	0.029	99.715
12	11	51.5	0.2525			
14	13	44.5	0.2161			
17	15.5	60	0.1961			
16	17.5	18	0.1795			
20	19	31.5	0.1544			
25	22.5	89	0.1353			
30	27.5	83	0.1235	0.034	0.029	99.715
37	33.5	71	0.0994			
40	38.5	29.5	0.0964			
45	42.5	49	0.0961			
50	47.5	47.5	0.0931	0.025	0.021	99.780
55	52.5	47	0.0922			
60	57.5	45	0.0882			
65	62.5	41	0.0804			
70	67.5	40	0.0764	0.025	0.021	99.780
75	72.5	36.5	0.0755			
80	77.5	36	0.0706			
85	82.5	35.5	0.0696			
90	87.5	34	0.0667	0.027	0.023	99.773
95	92.5	32.5	0.0637			
100	97.5	31.5	0.0616			
105	102.5	31	0.0608			
110	107.5	30	0.0588	0.022	0.018	99.815
115	112.5	30	0.0568			
120	117.5	30	0.0568			
125	122.5	30	0.0568			
130	127.5	30	0.0568			



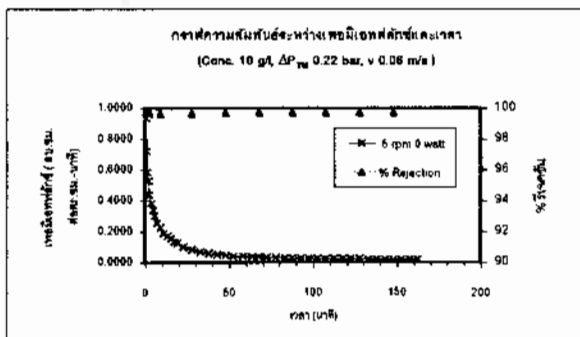
วันที่ 23/8/43

การทดลองที่	92	
Membrane specification		Membrane specification
ความดันคั่นของเมมเบรน	0.22 บาร์	จำนวนหน่วยเมมเบรน
ความยาวสายป้อน	0.06 เมตรต่อวินาที	ความดันคั่นของเมมเบรน
ความเข้มข้น	10 กรัมต่อลิตร	ค่าดัชนีความเข้มข้น
ความยาวของขด	5 รอบต่อหน่วย	

คำนวณด้วยโปรแกรม

permeate pure water (membrane)	2.00	ml/s	$R_m =$	1.4507E+09	1/cm	
permeate pure water (membrane +fouling+ce)	0.04	ml/s	$R_f =$	7.9128E+10	1/cm	$R_f = 7.7627E+10$ 1/cm
permeate pure water (membrane +fouling)	1.92	ml/s	$R_m + R_f =$	1.5007E+09	1/cm	$R_m = 5.0023E+07$ 1/cm

ชั่วโมง (min)	นาที	ปริมาณผลิต(ml)	พอลิมเมอร์ที่คั่น (mg/cm ² ·min)	ความกดน้ำโดย พอลิมเมอร์(gPa)	การเพิ่มชั้น พอลิมเมอร์(gPa)	ประสิทธิภาพ
0.5	0.25	48	0.9412			
1	0.75	37	0.7255			
1.5	1.25	30	0.5882			
2	1.75	27	0.6284			
3	2.5	45	0.4412	0.037	0.031	99.690
4	3.5	39	0.3824			
5	4.5	35	0.3491			
6	6.5	31	0.3039			
8	7	53	0.2598			
10	9	47	0.2304	0.042	0.035	99.648
12	11	39	0.1912			
14	13	36	0.1765			
16	15	32	0.1569			
18	17	28	0.1973			
20	19	26.5	0.1299			
25	22.5	54	0.1059			
30	27.5	44	0.0863	0.038	0.033	99.673
36	32.5	37	0.0725			
40	37.5	31.5	0.0618			
45	42.5	27	0.0529			
50	47.5	25	0.0498	0.035	0.023	99.736
55	52.5	22	0.0491			
61	58	25	0.0408			
66	63.5	19	0.0373			
70	68	14.5	0.0365	0.031	0.028	99.740
75	72.5	17.5	0.0343			
81	78	19.5	0.0319			
85	83	12.5	0.0308			
90	87.5	14.5	0.0284	0.03	0.025	99.748
95	92.5	14	0.0275			
100	97.5	13.5	0.0265			
105	102.5	13.25	0.0260			
110	107.5	12.75	0.0260	0.03	0.025	99.748
115	112.5	12.5	0.0245			
120	117.5	12.5	0.0245			
125	122.5	12	0.0235			
130	127.5	12	0.0235	0.029	0.024	99.757
135	132.5	11.5	0.0226			
140	137.5	11.5	0.0225			
145	142.5	11	0.0216			
150	147.5	10.5	0.0206	0.028	0.023	99.765
155	152.5	10.5	0.0206			
160	157.5	10.5	0.0206			
165	162.5	10.5	0.0206			



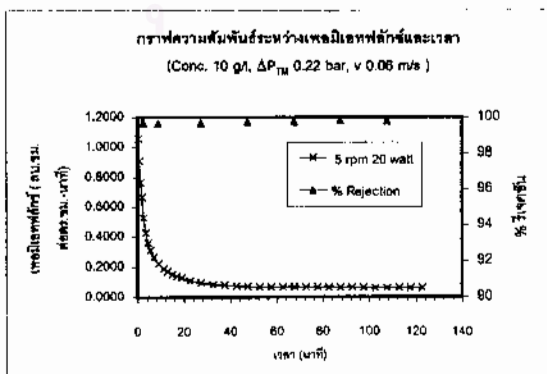
วันที่ 23/8/43
การทดลองที่ 93

ความดันคั่นเยื่อเมมเบรน	0.22 บาร์	จำนวนทวนคั่นวาล์ว	1 ตัว
ความเร็วการปั่น	0.06 เมตรต่อนาที	ความถี่คั่นเมมเบรน	26 กิโลเฮิรตซ์
ความเร็วหมุน	10 กรัมต่อนาที	กำลังคั่นเมมเบรน	20 วัตต์
ความเร็วรอบหมุน	5 รอบต่อนาที		

ค่าความต้านทานการกรอง

permeate pure water (membrane)	2.03 m/s	$R_m =$	1.4269E+09 1/cm	
permeate pure water (membrane+fouling+cak)	0.14 m/s	$R_f =$	2.1229E+10 1/cm	$R_f =$ 1.9132E+10 1/cm
permeate pure water (membrane+fouling)	1.38 m/s	$R_f + R_m =$	2.0974E+09 1/cm	$R_f =$ 6.7047E+08 1/cm

ช่วงเวลา (min)	เวลาที่ (min)	ปริมาตร(ml)	ฟลูอิดฟลักซ์ (cm ³ /cm ² *min)	ค่าจากสเปกโตร	ความเข้มข้นฟลูอิด (g/l)	% รีเจกชัน
0.5	0.25	54	1.0588			
1	0.75	48.5	0.9118			
1.5	1.25	36	0.7647			
2	1.75	34	0.8667			
3	2.5	54	0.5294	0.034	0.029	99.715
4	3.5	44	0.4314			
5	4.5	37	0.3627			
6	5.5	32	0.3137			
8	7	54	0.2647			
10	9	48	0.2256	0.039	0.033	99.673
12	11	38.5	0.1887			
14	13	35	0.1716			
16	15	31	0.1520			
18	17	29	0.1422			
20	19	26.5	0.1289			
25	22.5	57	0.1118			
30	27.5	49.5	0.0971	0.036	0.030	99.696
35	32.5	44	0.0863			
40	37.5	41	0.0804			
45	42.5	38.5	0.0755			
50	47.5	36.5	0.0716	0.028	0.023	99.765
55	52.5	35.5	0.0696			
60	57.5	35	0.0686			
65	62.5	35	0.0686			
70	67.5	34.5	0.0676	0.027	0.023	99.773
75	72.5	34	0.0667			
80	77.5	34	0.0667			
85	82.5	33.5	0.0657			
90	87.5	33	0.0647	0.02	0.017	99.832
95	92.5	32.5	0.0637			
100	97.5	31.5	0.0618			
105	102.5	31	0.0608			
110	107.5	31	0.0608	0.022	0.018	99.815
115	112.5	31	0.0608			
120	117.5	31	0.0608			
125	122.5	31	0.0608			



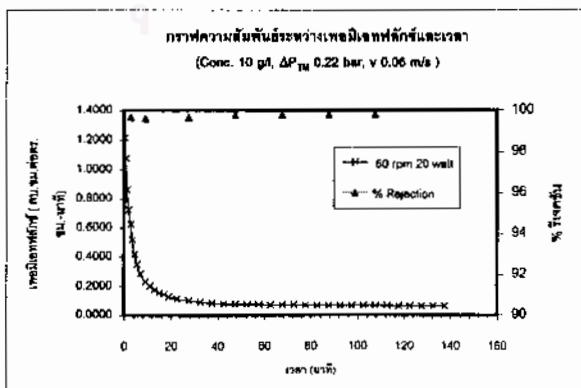
วันที่ 25/8/43
การทดลองที่ 95

ความเค็มของน้ำดิบ	0.22	บาร์	จำนวนการเดินเครื่อง	1	ชั่วโมง
ความเร็วไหลเวียน	0.08	เมตรต่อวินาที	ความเข้มข้นของน้ำดิบ	20	กรัม/ลิตร
ความเข้มข้น	10	กรัมต่อลิตร	ค่าคงที่ในสมการ	20	วัตต์
ความเร็วรอบหมุน	5	รอบต่อนาที			

ค่าความต้านทานการกรอง

permeate pure water (membrane)	2.27	ml/s	$R_m =$	1.2800E+09	1/cm	
permeate pure water (membrane+fouling+cake)	0.11	ml/s	$R_f =$	2.6376E+10	1/cm	$R_f = 2.5018E+10$ 1/cm
permeate pure water (membrane+fouling)	2.13	ml/s	$R_m + R_f =$	1.3600E+09	1/cm	$R_m = 8.0001E+07$ 1/cm

ช่วงเวลา (min)	นาฬิกา	ปริมาณคอก (ml)	เฉลี่ยของคอก (cm ³ /cm ² /min)	ค่าจากสมการ	ความเข้มข้นเฉลี่ย (g/l)	% ใสจลน
0.5	0.25	62	1.2157			
1	0.75	55	1.0784			
1.5	1.25	44	0.8827			
2.5	2	74	0.7256			
3	2.75	32	0.6275	0.038	0.032	99.861
4	3.5	53	0.5196			
5	4.5	43	0.4216			
6	5.5	36	0.3529			
8	7	58.6	0.2868			
10	9	48	0.2353	0.045	0.038	99.622
12	11	41.5	0.2034			
14	13	36	0.1785			
16	15	32	0.1569			
18	17	26.5	0.1446			
20	19	26	0.1275			
25	22.5	57.5	0.1127			
30	27.5	52	0.1020	0.04	0.034	99.664
35	32.5	46.5	0.0912			
40	37.5	43	0.0843			
45	42.5	40	0.0784			
50	47.5	39.5	0.0775	0.027	0.023	99.773
55	52.5	38	0.0746			
60	57.5	37.5	0.0736			
65	62.5	36.5	0.0716			
70	67.5	36.5	0.0716	0.022	0.018	99.815
75	72.5	36.5	0.0716			
80	77.5	35.5	0.0696			
85	82.5	35	0.0686			
90	87.5	35	0.0686	0.021	0.018	99.824
95	92.5	34	0.0687			
100	97.5	33.5	0.0657			
105	102.5	33.5	0.0657			
110	107.5	33	0.0647	0.02	0.017	99.832
115	112.5	33	0.0647			
120	117.5	32.5	0.0637			
125	122.5	32	0.0627			
130	127.5	32	0.0627			
135	132.5	32	0.0627			
140	137.5	32	0.0627			



วันที่ 28/8/43

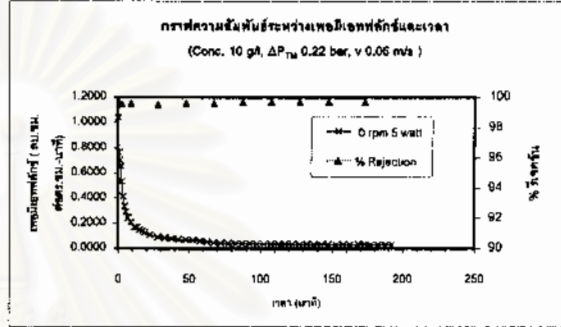
การทดลองที่ 06

ค่าพารามิเตอร์	หน่วย	ค่า	หมายเหตุ
ความหนืดของน้ำ	มพ	0.22	จำนวนรอบคาลิเบรต
ความดันป้อน	เมกะปาสกาล	0.06	ความดันของน้ำ
ความเข้มข้น	กรัม/ลิตร	10	ค่าคงที่ของน้ำ
ความเร็วหมุน	รอบต่อนาที	0	

ค่าความดันครอสฟอลว

permeate pure water (membrane)	2.17	m/s	$R_m = 1.3391E+09$	1/cm
permeate pure water (membrane+fouling+cake)	0.06	m/s	$R_f = 6.2752E+10$	1/cm
permeate pure water (membrane+fouling)	2.00	m/s	$R_m+R_f = 1.4507E+09$	1/cm

ระยะเวลา (min)	น้ำหนัก	ปริมาตร (ml)	ผลผลิตสุทธิ (cm ³ cm ⁻² min ⁻¹)	ค่าจากสเปกโตร	ความเข้มข้นของแข็ง (g/l)	%รีเจกชัน
0.5	0.25	53	1.0392			
1	0.75	39	0.7547			
1.5	1.25	36	0.7059			
2	1.75	33.5	0.6589			
3	2.5	54.5	0.6343	0.051	0.043	99.572
4	3.5	42.5	0.4187			
5	4.5	34.5	0.3382			
6	5.5	30	0.2941			
8	7	50	0.2451			
10	9	42	0.2059	0.049	0.041	99.589
13	11.5	52.5	0.1716			
14	13.5	17	0.1667			
16	15	30	0.1471			
18	17	26	0.1373			
20	19	25.5	0.1250			
25	22.5	55	0.1076			
31	28	57	0.0931	0.052	0.044	99.584
35	33	34	0.0833			
40	37.5	38.5	0.0755			
45	42.5	35	0.0706			
50	47.5	34	0.0657	0.045	0.038	99.622
55	52.5	34	0.0667			
60	57.5	30	0.0588			
65	62.5	26	0.0510			
70	67.5	23.5	0.0461	0.049	0.041	99.589
75	72.5	22	0.0431			
80	77.5	20.75	0.0407			
85	82.5	20	0.0392			
90	87.5	19.75	0.0387	0.039	0.033	99.673
95	92.5	19	0.0373			
100	97.5	19	0.0373			
105	102.5	18.75	0.0368			
110	107.5	18.75	0.0368	0.035	0.029	99.706
115	112.5	18.5	0.0363			
120	117.5	18.25	0.0358			
125	122.5	17.75	0.0346			
130	127.5	17.5	0.0343	0.035	0.030	99.698
135	132.5	17	0.0333			
140	137.5	16.75	0.0328			
145	142.5	16.75	0.0328			
150	147.5	16.75	0.0328	0.033	0.028	99.723
155	153	19.5	0.0319			
160	158	13.5	0.0331			
164	163	19.5	0.0319			
171	168.5	16.5	0.0324			
175	173	13.5	0.0331	0.035	0.029	99.706
180	177.5	16	0.0314			
185	182.5	15	0.0314			
190	187.5	16	0.0314			
195	192.5	16	0.0314			



สงวนลิขสิทธิ์
สงวนลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัย

วันที่ 28/6/43

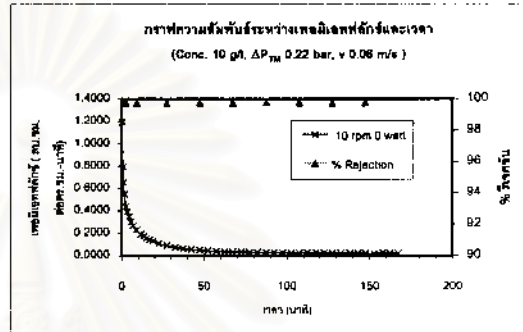
การทดลองที่ 07

ความดันคั่นหน่วยเมมเบรน	0.22 บาร์	จำนวนรอบการสั่นของมอเตอร์	1	ตัว
ความเร็วสายพาน	0.05 เมตรต่อวินาที	ความหนืดของของเหลว	28	ซี.พี.เอ.ซี.
ความเข้มข้น	10 กรัมต่อลิตร	ค่าคงที่ของของเหลว	0	วัตต์
ความเร็วรอบหมุน	10 รอบต่อนาที			

คำนวณความต้านทานการกรอง

permeate pure water (membrane)	2.77	m/s	$R_m =$	$1.0467E+09$	1/cm	$R_f =$	$7.8110E+10$	1/cm
permeate pure water (membrane+fouling+cake)	0.04	m/s	$R =$	$7.9128E+10$	1/cm	$R_p =$	$3.0963E+07$	1/cm
permeate pure water (membrane+fouling)	2.85	m/s	$R_p + R_m =$	$1.0180E+09$	1/cm			

ช่วงเวลา (min)	น้ำหนัก (g)	ปริมาตร (ml)	ผลผลิต (cm ³ /cm ² ·min)	ค่าการเปลี่ยนแปลง	ความเข้มข้น (g/L)	รีเจกชัน (%)
0.5	0.25	61	1.1961			
1	0.75	40.5	0.7841			
1.5	1.25	33.5	0.6569			
2	1.75	28	0.5490			
3	2.5	45	0.4412	0.028	0.023	99.765
4	3.5	39.5	0.3873			
5	4.5	36.5	0.3480			
6	5.5	30.5	0.2990			
8	7	54	0.2647			
10	9	48.5	0.2279	0.028	0.023	99.765
13	11.5	58.5	0.1812			
14	13.5	18	0.1765			
18	15	32	0.1569			
18	17	29	0.1422			
20	19	27	0.1324			
25	22.5	66	0.1098			
30	27.5	46	0.0902	0.031	0.026	99.740
36	32.5	38.5	0.0756			
40	37.6	32.5	0.0637			
45	42.5	27.5	0.0539			
50	47.5	25.5	0.0500	0.029	0.024	99.757
55	52.5	23	0.0451			
60	57.5	21	0.0412			
65	62.5	18.5	0.0383			
70	67.5	18	0.0363	0.029	0.024	99.767
75	72.5	17	0.0333			
80	77.5	16	0.0314			
85	82.5	15.5	0.0304			
90	87.5	14.5	0.0284	0.025	0.021	99.790
95	92.5	14	0.0276			
100	97.5	14	0.0276			
105	102.5	13.75	0.0270			
110	107.5	13.5	0.0266	0.027	0.023	99.773
115	112.5	13	0.0255			
120	117.5	13	0.0255			
125	122.5	12.5	0.0246			
130	127.5	12.25	0.0240	0.028	0.023	99.765
135	132.5	11.75	0.0230			
141	138	14	0.0228			
145	143	9	0.0221			
150	147.5	11	0.0216	0.026	0.022	99.782
156	153	10.5	0.0172			
160	158	10.5	0.0267			
165	162.5	10.5	0.0206			
170	167.5	10.5	0.0206			



ศูนย์บริการ
มหาวิทยาลัย

วันที่ 28/8/43
 การทดลองที่ 06

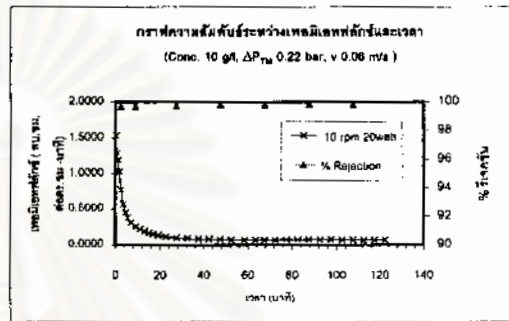
ความเข้มข้นเริ่มต้น	0.22 นาฬ	จำนวนการทดสอบ	1	ตัว
ความยาวสายม้วน	0.06 เมตรต่อวินาที	ความดันที่เพิ่มขึ้น	26	มิถุนายน
ความเข้มข้น	10 กรัมต่อลิตร	ค่าคงที่ในหน่วยอื่น	20	ตัว
ความยาวของม้วน	10 รอบต่อนาที			

ค่ารวมตัวตามค่าทดลอง

permeate pure water (membrane)	2.83	m/s	$R_m =$	$1.0240E+09$	1/cm
permeate pure water (membrane+fouling+calc)	1.23	m/s	$R_f =$	$2.3525E+09$	1/cm
permeate pure water (membrane+fouling)	2.77	m/s	$R_p + R_m =$	$1.0487E+09$	1/cm

$R_p = 1.3035E+09$ 1/cm
 $R_p = 2.4675E+07$ 1/cm

ช่วงเวลา (นาฬ)	นาฬิกา	ปริมาณผลิต (ml)	ผลผลิตเฉลี่ย (cm ³ /cm ² ·min)	ค่าจากกราฟ	ความเข้มข้นเฉลี่ย (g/l)	% ฟื้นตัว
0.5	0.25	78	1.6294			
1	0.75	68	1.2941			
1.5	1.25	61	1.1961			
2	1.75	52.5	1.0294			
3	2.5	79	0.7745	0.036	0.030	99.696
4	3.5	58.5	0.5735			
5	4.5	46	0.4510			
6	5.5	38.5	0.3775			
8	7	63	0.3088			
10	9	52	0.2548	0.035	0.029	99.706
12	11	44.5	0.2181			
14	13	39	0.1912			
16	15	34	0.1667			
18	17	31	0.1520			
20	19	28	0.1373			
25	22.5	59	0.1167			
30	27.5	51	0.1090	0.031	0.026	99.740
35	32.5	46	0.0802			
40	37.5	42	0.0624			
45	42.5	40	0.0764			
50	47.5	38	0.0745	0.022	0.016	99.615
55	52.5	37	0.0725			
62	58.5	50	0.0700			
65	63.5	22.5	0.0735			
70	67.5	36	0.0706	0.02	0.017	99.632
75	72.5	36	0.0706			
80	77.5	38	0.0745			
85	82.5	37.5	0.0735			
90	87.5	38	0.0745	0.019	0.016	99.641
95	92.5	38	0.0745			
100	97.5	38	0.0745			
105	102.5	37.5	0.0735			
110	107.5	37	0.0725	0.021	0.016	99.624
115	112.5	37	0.0725			
120	117.5	37.6	0.0735			
125	122.5	37	0.0725			



สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

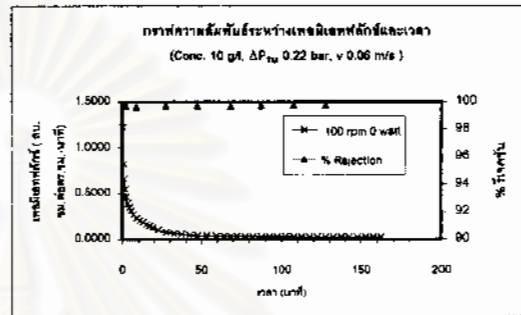
วันที่ 29/8/43
การทดลองที่ 99

ความเข้มข้นของเยื่อ	0.22 บาร์	จำนวนรอบตัวกรอง	1	ตัว
ความเร็วไหลเวียน	0.06 เมตรต่อวินาที	ความถี่ที่กลั่นแยกเยื่อ	20	กิโลวัตต์
ความเข้มข้น	10 กรัมต่อลิตร	กำลังกลั่นแยกเยื่อ	0	วัตต์
ความถี่รอบหมุน	100 รอบต่อวินาที			

ค่าความต้านทานการกรอง

deminate pure water (membrane)	2.97	m/s	$R_m \times$	$0.7799E+08$	1/cm	
deminate pure water (membrane+fouling) cek	0.05	m/s	$R =$	$5.0026E+10$	1/cm	$R = 5.9072E+10$ 1/cm
deminate pure water (membrane+fouling)	3.03	m/s	$R_1 + R_m =$	$9.5649E+08$	1/cm	$R_1 = 2.1494E+07$ 1/cm

ช่วงเวลา (min)	นาฬิกา	ปริมาตร(ml)	ความเข้มข้น (mg/30cm ² /min)	ค่าจากสมการ	ความเข้มข้น (mg/ml)	% รีเจกชัน
0.5	0.25	52.5	1.2256			
1	0.76	42	0.8235			
1.5	1.25	33.5	0.8569			
2	1.75	28	0.5490			
3	2.5	47.5	0.4667	0.033	0.028	99.723
4	3.5	40	0.3922			
5	4.5	35.5	0.3480			
6	5.5	32	0.3137			
8	7	55	0.2696			
10	9	47.5	0.2328	0.041	0.034	99.656
12	11	41.5	0.2034			
14	13	37	0.1814			
16	15	33	0.1818			
18	17	29	0.1422			
20	19	26	0.1275			
25	22.5	51.5	0.1010			
30	27.5	40	0.0784	0.037	0.031	99.690
35	32.5	32.5	0.0637			
40	37.5	28	0.0549			
45	42.5	24	0.0471			
50	47.5	22	0.0431	0.032	0.027	99.732
57	53.5	26	0.0382			
62	59.5	19	0.0373			
67	64.5	18	0.0353			
70	68.5	11	0.0359	0.036	0.029	99.706
75	72.5	17.25	0.0338			
80	77.5	16.25	0.0310			
85	82.5	15.5	0.0304			
90	87.5	15.25	0.0298	0.028	0.023	99.765
95	92.5	15	0.0294			
100	97.5	14.25	0.0279			
105	102.5	14	0.0275			
110	107.5	13.5	0.0265	0.028	0.023	99.765
115	112.5	13	0.0255			
120	117.5	13	0.0255			
125	122.5	12.75	0.0260			
130	127.5	12.75	0.0250	0.028	0.023	99.765
136	132.5	12.5	0.0245			
140	137.5	12.25	0.0240			
145	142.5	12.25	0.0240			
150	147.5	12	0.0235			
155	152.5	12	0.0235			
160	157.5	12	0.0235			
165	162.5	12	0.0235			



สงวนลิขสิทธิ์
สำนักงานวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

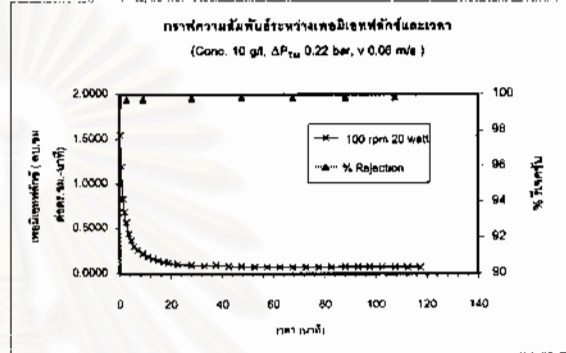
วันที่ 28/8/43
การทดลองที่ 100

ความเค็มของเยื่อเมมเบรน	0.22 บาร์	จำนวนภาชนะดีฟิวเซอร์	1 ตัว
ความเร็วสายพาน	0.06 เมตรต่อนาที	ความถี่คลื่นเพอร์เมเอเตอร์	28 กิโลเฮิรตซ์
ความเข้มข้น	10 กรัม/ลิตร	กำลังคลื่นเพอร์เมเอเตอร์	20 วัตต์
ความถี่ของสัญญาณ	0 รอบต่อนาที		

ค่าความต้านทานการกรอง

permeate pure water (membrane)	2.80	m/s	$R_m =$	$1.0362E+09$	1/cm	
permeate pure water (membrane+fouling+cake)	0.13	m/s	$R_f =$	$2.2606E+10$	1/cm	$R = 2.1492E+10$
permeate pure water (membrane+fouling)	2.60	m/s	$R_p + R_m =$	$1.1159E+09$	1/cm	$R_f = 7.6708E+07$

ช่วงเวลา (min)	เวลาที่ 1 (min)	ปริมาณ (ml)	เพอร์เมเอต (cm ³ /m ² /min)	ค่าจากสมการโคช	ความเข้มข้นเพอร์เมเอต (g/l)	ร้อยละ
0.5	0.25	79	1.5490			
1	0.75	61	1.1961			
1.5	1.25	42.6	0.8333			
2	1.75	35	0.6863			
3	2.5	58	0.6896	0.035	0.029	99.706
4	3.5	45	0.4412			
6	4.5	38	0.3726			
6	5.5	31	0.3039			
8	7	54	0.2647			
10	9	45	0.2208	0.031	0.026	99.740
12	11	38.6	0.1887			
14	13	33.5	0.1642			
16	15	29.5	0.1445			
18	17	26	0.1275			
20	19	24	0.1175			
25	22.5	52	0.1020			
31	28	58	0.0915	0.024	0.020	99.759
35	33	35.5	0.0870			
40	37.5	46.5	0.0912			
45	42.5	42	0.0824			
50	47.5	40	0.0784	0.018	0.015	99.849
55	52.5	36.5	0.0755			
60	57.5	38	0.0745			
65	62.5	38	0.0745			
70	67.5	37	0.0725	0.019	0.016	99.841
75	72.5	37	0.0725			
80	77.5	37	0.0725			
85	82.5	37	0.0725			
91	88	46.5	0.0743	0.016	0.015	99.849
95	93	31	0.0780			
100	97.5	37.5	0.0735			
105	102.5	37.5	0.0735			
110	107.5	37.5	0.0735	0.017	0.014	99.857
115	112.5	37	0.0725			
120	117.5	37	0.0725			



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วันที่ 30/8/43

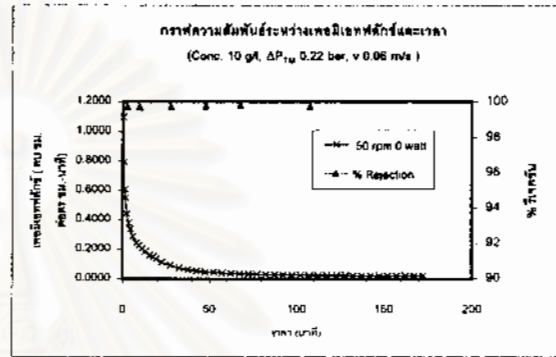
การทดลองที่ 101

ความเข้มข้นเริ่มต้น	0.22	บาร์	จำนวนรอบการวิ่ง	1	ตัว
ความเข้มข้น	0.06	เมมเบรน	ความถี่ในการวิ่ง	28	กิโลเมตร
ความเข้มข้น	10	กิโลเมตร	ค่าคงที่ในการวิ่ง	0	ตัว
ความถี่ในการวิ่ง	50	รอบการวิ่ง			

ค่าความต้านทานการกรอง

permeate pure water (membrane)	2.83	m/s	$R_m =$	$1.0240E+09$	1/cm
permeate pure water (membrane+fouling+cake)	0.04	m/s	$R_f =$	$8.2886E+10$	1/cm
permeate pure water (membrane+fouling)	2.80	m/s	$R_c + R_m =$	$1.1168E+09$	1/cm
				$R_c =$	$8.1780E+10$
				$R_c =$	$9.1898E+07$

จำนวนรอบการวิ่ง (min)	เวลาที่ผ่านไป (min)	ปริมาตร (ml)	ผลผลิตสุทธิ (cm ³ /min)	ค่าการเปลี่ยนแปลง	ความเข้มข้น (g/l)	ประสิทธิภาพ (%)
0.5	0.25	58	1.0980			
1	0.75	40.5	0.7941			
1.5	1.25	31	0.6078			
2	1.75	28	0.5480			
3	2.5	45	0.4412	0.033	0.028	99.723
4	3.5	38.5	0.3775			
5	4.5	34.5	0.3382			
7	8	58.5	0.2868			
9	8	60	0.2451			
10	8.5	23	0.2255	0.035	0.029	99.706
12	11	41.5	0.2034			
14	13	38	0.1883			
17	15.5	48	0.1589			
18	17.5	15.5	0.1520			
20	19	27.5	0.1348			
25	22.5	57	0.1118			
30	27.5	48	0.0902	0.029	0.024	99.757
35	32.5	38	0.0745			
40	37.5	32	0.0627			
45	42.5	28	0.0549			
50	47.5	24.5	0.0480	0.025	0.021	99.780
56	52.5	23	0.0451			
60	57.5	20	0.0392			
65	62.5	19	0.0373			
70	67.5	17.5	0.0343	0.023	0.019	99.807
75	72.5	16.5	0.0324			
80	77.5	16	0.0314			
85	82.5	15	0.0294			
90	87.5	14.5	0.0284			
95	92.5	14	0.0275			
100	97.5	13.5	0.0265			
105	102.5	13	0.0255			
110	107.5	12.5	0.0245	0.027	0.023	99.773
115	112.5	12.25	0.0240			
120	117.5	12.25	0.0240			
126	123	14	0.0229			
130	128	9.5	0.0233			
135	132.5	11.5	0.0225			
140	137.6	11.28	0.0221			
145	142.5	11	0.0216			
150	147.5	10.75	0.0211			
165	162.5	10.75	0.0211			
160	157.5	10.5	0.0206			
165	162.5	10.5	0.0206			
170	167.5	10.5	0.0206			
175	172.5	10.5	0.0206			



สถาบันวิทยบริการ
 วิทยาลัยเทคโนโลยี

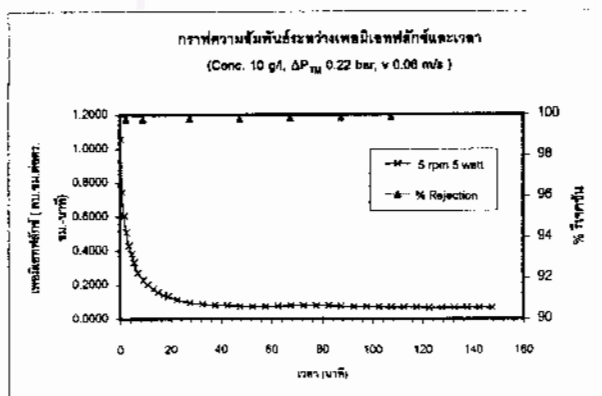
วันที่ 1/9/43
 ภาชคตตงที 105

ความดันคตมอเมตม	0.22 บาร์	จำนวนทรานดวเจอร	1 ต
ความเร็วคตวอช	0.06 เมตรต่อวินาที	ความค้คตมอเมตม	28 กิโลเมตง
ความเข้มข้น	10 กรัมต่อลิตร	ค่าค้คตมอเมตม	5 วัต
ความเร็วคตมอเมตม	5 รอบต่อนาที		

ค่าความค้คตมอเมตม

permeate pure water (membrane)	2.40 ml/s	$R_m =$	1.2089E+09 1/cm		
permeate pure water (membrane+fouling+cake)	0.15 ml/s	$R_f =$	1.9342E+10 1/cm	$R_c =$	1.7219E+10 1/cm
permeate pure water (membrane+fouling)	1.37 ml/s	$R_p + R_m =$	2.1229E+09 1/cm	$R_c =$	9.1405E+08 1/cm

ช่วงเวลา (min)	นาฬิก	ปริมาตร(ml)	เทมปีเชตค้คตม (cm ³ /cm ² /min)	ค่าจวคตมอเมตม	ความเข้มข้น เทมปีเชตค้คตม (g/l)	% ค้คตม
0.5	0.25	54	1.0588			
1	0.75	36	0.7451			
2	1.5	62	0.6078			
3	2.5	52	0.5098	0.025	0.021	99.790
4	3.5	44	0.4314			
5	4.5	39	0.3824			
6	5.5	34	0.3333			
8	7	55.5	0.2721			
10	9	47	0.2304	0.024	0.020	99.799
12	11	41	0.2010			
14	13	36	0.1765			
16	15	32	0.1569			
18	17	29	0.1422			
20	19	27	0.1324			
25	22.5	57.5	0.1127			
30	27.5	49	0.0961	0.021	0.018	99.824
35	32.5	44	0.0863			
40	37.5	41	0.0804			
45	42.5	39	0.0765			
50	47.5	37.5	0.0735	0.024	0.020	99.799
55	52.5	37	0.0725			
60	57.5	37	0.0725			
65	62.5	37.5	0.0739			
70	67.5	39	0.0785	0.019	0.016	99.841
75	72.5	39	0.0765			
80	77.5	39	0.0765			
85	82.5	39	0.0785			
90	87.5	38	0.0745	0.015	0.013	99.874
95	92.5	37	0.0725			
100	97.5	37	0.0725			
105	102.5	36.5	0.0716			
110	107.5	35	0.0686	0.014	0.012	99.883
115	112.5	34.5	0.0676			
120	117.5	34.5	0.0676			
125	122.5	34	0.0667			
130	127.5	34	0.0667			
135	132.5	33.5	0.0657			
140	137.5	33.5	0.0657			
145	142.5	33.5	0.0657			
150	147.5	33.5	0.0657			



วันที่ 2/6/43

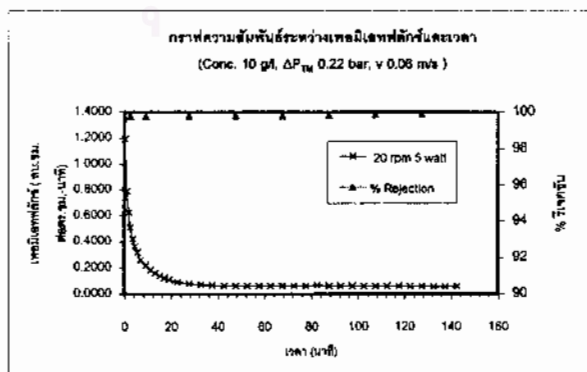
การทดลองที่ 106

ความดันคอมเพรสเซอร์	0.22 บาร์	จำนวนหน้าเมมเบรน	1 ตัว
ความเร็วฟลูวיד	0.08 เมตรต่อนาที	ความเข้มข้นของเกลือ	20 กรัม/ลิตร
ความเข้มข้น	10 กรัม/ลิตร	ค่าตั้งต้นของเกลือ	0 กรัม
ความเร็วรอบรอบ	50 รอบต่อนาที		

ค่าความต้านทานการก่อกอง

permeate pure water (membrane)	2.67 m/s	$R_m =$	$1.0880E+09$ 1/cm	
permeate pure water (membrane fouling+cake)	0.12 m/s	$R_f =$	$2.4178E+10$ 1/cm	$R = 2.3033E+10$ 1/cm
permeate pure water (membrane +fouling)	2.53 m/s	$R_p + R_m =$	$1.1453E+09$ 1/cm	$R_p = 5.7264E+07$ 1/cm

ช่วงเวลา (min)	นาฬิกา	ปริมาตร(ml)	เกลือที่ผลิตได้ (cm ³ cm ² /min)	ค่าจากสเปกโตร	ความเข้มข้นเกลือที่ผลิต (g/l)	% ฟื้นฟู
0.5	0.25	61	1.1981			
1.5	1	61	0.7941			
2	1.75	32	0.6275			
3	2.5	52	0.5098	0.025	0.021	99.790
4	3.5	43	0.4216			
5	4.5	37	0.3527			
6	5.5	32.5	0.3186			
8	7	53	0.2598			
10	8	45	0.2208	0.025	0.021	99.790
12	11	37.5	0.1838			
14	13	32.5	0.1583			
16	15	28	0.1373			
18	17	25	0.1225			
20	19	22	0.1078			
25	22.5	48	0.0941			
30	27.5	41.5	0.0814	0.021	0.018	99.824
35	32.5	37	0.0725			
40	37.5	35	0.0686			
45	42.5	33	0.0647			
50	47.5	32.5	0.0637	0.021	0.018	99.824
55	52.5	32.5	0.0637			
60	57.5	32	0.0627			
65	62.5	32	0.0627			
70	67.5	32	0.0627	0.02	0.017	99.832
75	72.5	32.5	0.0637			
80	77.5	33	0.0647			
85	82.5	35	0.0686			
90	87.5	33	0.0647	0.019	0.018	99.841
95	92.5	32.5	0.0637			
100	97.5	32	0.0627			
105	102.5	31.5	0.0618			
110	107.5	31.5	0.0618	0.012	0.010	99.899
115	112.5	31	0.0608			
120	117.5	31	0.0608			
125	122.5	30.5	0.0598			
130	127.5	30	0.0588	0.012	0.010	99.899
135	132.5	29	0.0569			
140	137.5	29	0.0569			
145	142.5	30	0.0588			



วันที่ 4/9/43
 การทดลองที่ 107

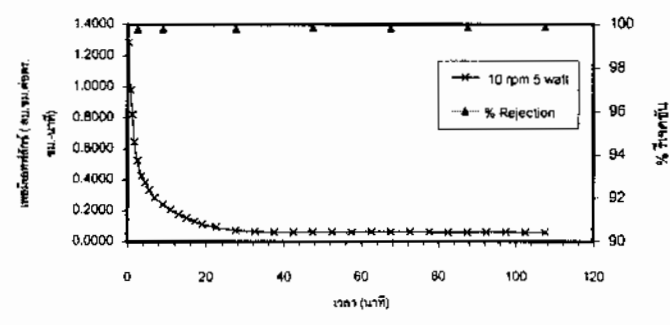
ความดันคร่อมเยื่อแผ่น	0.22 บาร์	จำนวนทรานส์มิเตอร์	1 ตัว
ความเร็วสายป้อน	0.06 เมตรต่อวินาที	ความดันคั่นเหนือเยื่อ	28 กิโลเอ็พิก
ความเข้มข้น	10 กรัมต่อลิตร	กำลังคั่นเหนือเยื่อ	5 วัตต์
ความเร็วรอบหมุน	10 รอบต่อนาที		

ค่าความต้านทานการกรอง

permeate pure water (membrane)	2.63	m/s	$R_m =$	1.1018E+09	1/cm	
permeate pure water (membrane+fouling)	0.12	m/s	$R_f =$	2.3525E+10	1/cm	$R_p = 2.2348E+10$ 1/cm
permeate pure water (membrane+fouling)	2.47	m/s	$R_m + R_p =$	1.1762E+09	1/cm	$R_p = 7.4445E+07$ 1/cm

ช่วงเวลา (min)	นาฬิกา	ปริมาณสาร(พ)	เพอเมิเอตฟลักซ์ (cm ³ /cm ² *min)	ค่าจากสเปกโตร	ความเข้มข้นเพอเมิเอต(g/l)	% รีเจกชัน
0.5	0.25	65.5	1.2843			
1	0.75	50	0.9804			
1.5	1.25	42	0.8235			
2	1.75	33	0.6471			
3	2.5	53.5	0.5245	0.024	0.020	99.799
4	3.5	43.5	0.4265			
5	4.5	39	0.3824			
6	5.5	34	0.3333			
8	7	58	0.2843			
10	9	49	0.2402	0.023	0.019	99.807
12	11	42	0.2059			
14	13	36	0.1765			
16	15	31.5	0.1544			
18	17	27	0.1324			
20	19	23	0.1127			
25	22.5	46	0.0941			
30	27.5	36	0.0745	0.022	0.018	99.815
35	32.5	34	0.0667			
40	37.5	32	0.0627			
45	42.5	32	0.0627			
50	47.5	32.5	0.0637	0.017	0.014	99.857
55	52.5	32	0.0627			
60	57.5	32	0.0627			
65	62.5	32.5	0.0637			
70	67.5	33	0.0647	0.02	0.017	99.832
75	72.5	33	0.0647			
80	77.5	31	0.0608			
85	82.5	30	0.0588			
90	87.5	30	0.0588	0.015	0.013	99.874
95	92.5	31	0.0608			
100	97.5	31	0.0608			
105	102.5	30	0.0588			
110	107.5	30	0.0588	0.014	0.012	99.883

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเพอเมิเอตฟลักซ์และเวลา
 (Conc. 10 g/l, ΔP_{TM} 0.22 bar, v 0.06 m/s)



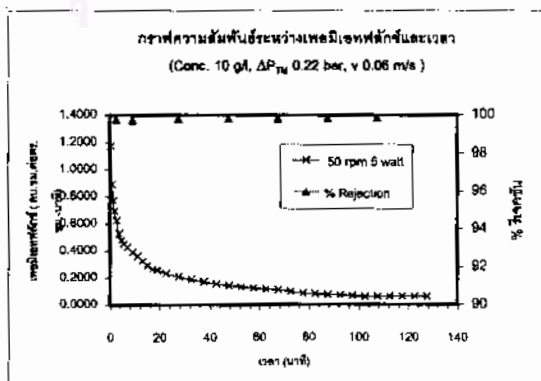
วันที่ 4/9/43
 การทดลองที่ 108

ความดันป้อนเริ่มต้น	0.22 บาร์	จำนวนทางเดินเชิงเรขาคณิต	1 ตัว
ความเร็วไหลเวียน	0.06 เมตรต่อวินาที	ความดันเส้นเหนือเส้น	28 กิโลวัตต์
ความเข้มข้น	10 กรัมต่อลิตร	กำลังขับเคลื่อนมอเตอร์	5 วัตต์
ความเร็วรอบหมุน	50 รอบต่อนาที		

ค่าความต้านทานการกรอง

permeate pure water (membrane)	2.85 m/s	$R_m =$	$1.0949E+09$ 1/cm	
permeate pure water (membrane+fouling+cake)	0.14 m/s	$R_f =$	$2.0724E+10$ 1/cm	$R_f = 1.9141E+10$ 1/cm
permeate pure water (membrane+fouling)	1.63 m/s	$R_f + R_m =$	$1.5626E+09$ 1/cm	$R_f = 4.8771E+08$ 1/cm

ช่วงเวลา (min)	เวลาที่	ปริมาตร(ml)	เพอเมอเทต (cm ³ /cm ² /min)	ค่าการสเปกโตร	ความเข้มข้น (เพอเมอเทต(g/l))	% รีเจกชัน
0.5	0.25	60	1.1765			
1	0.75	45.5	0.8922			
1.5	1.25	39.5	0.7745			
2	1.75	35.5	0.6961			
3	2.5	64	0.6275	0.027	0.023	99.773
4	3.5	54	0.5294			
5	4.5	49	0.4804			
6	5.5	46	0.4510			
8	7	87.5	0.4289			
10	9	60	0.3922	0.03	0.025	99.748
12	11	73.5	0.3603			
14	13	66.5	0.3260			
16	15	60	0.2941			
18	17	55	0.2696			
20	19	53	0.2586			
25	22.5	120	0.2353			
30	27.5	106	0.2118	0.023	0.019	99.807
35	32.5	97	0.1902			
40	37.5	88	0.1725			
45	42.5	80	0.1569			
50	47.5	73	0.1431	0.02	0.017	99.832
55	52.5	67.5	0.1324			
60	57.5	62.5	0.1225			
65	62.5	60	0.1176			
70	67.5	57	0.1118	0.019	0.016	99.841
75	72.5	50	0.0960			
80	77.5	45	0.0882			
85	82.5	41.5	0.0814			
90	87.5	39	0.0765	0.017	0.014	99.857
95	92.5	37	0.0725			
100	97.5	34	0.0667			
105	102.5	32	0.0627			
110	107.5	32	0.0627	0.015	0.013	99.874
115	112.5	32	0.0627			
120	117.5	32	0.0627			
125	122.5	32	0.0627			
130	127.5	32	0.0627			



วันที่ 5/9/43

การทดลองที่ 109

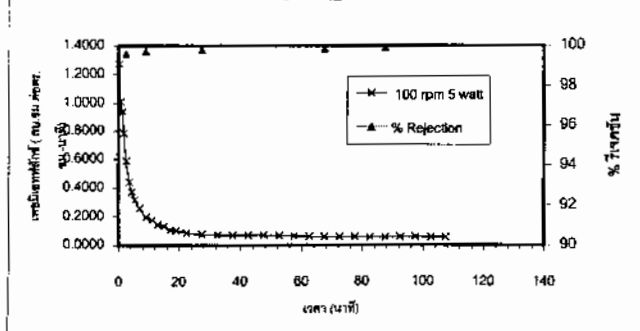
ความเค็มของเยื่อแผ่น	0.22 บาร์	จำนวนชามสเตนเลส	1	คิว
ความเข้มข้นป้อน	0.06 มลต่อวินาที	ความเค็มพื้นของเยื่อ	28	กิโลลิตร
ความเข้มข้น	10 กรัมต่อลิตร	กำลังคลื่นของเยื่อ	5	วัตต์
ความเข้มข้นบน	100 กรัมต่อวินาที			

ค่าความต้านทานการกรอง

permeate pure water (membrane)	2.80	ml/s	$R_m =$	$1.0362E+09$	1/cm	
permeate pure water (membrane+fouling+cake)	0.10	ml/s	$R_f =$	$1.6330E+10$	1/cm	$R_f = 1.5200E+10$ 1/cm
permeate pure water (membrane+fouling)	2.57	ml/s	$R_p + R_m =$	$1.1304E+09$	1/cm	$R_p = 9.4200E+07$ 1/cm

ช่วงเวลา (min)	นาฬิกา	ปริมาตร(ml)	เพอเมอเรตที่กัก (cm ³ cm ² min)	ค่าจากสเปคโตร	ความเข้มข้นเพอเมอเรต(g/l)	% รีเจคชัน
0.5	0.25	65	1.2745			
1	0.75	51.5	1.0098			
1.5	1.25	48	0.9412			
2	1.75	40	0.7643			
3	2.5	60	0.5882	0.049	0.041	99.589
4	3.5	45	0.4412			
5	4.5	38	0.3725			
6	5.5	32.5	0.3186			
6	7	53	0.2598			
11	9.5	60.5	0.1977	0.033	0.028	99.723
12	11.5	18	0.1765			
15	13.5	44	0.1438			
16	15.5	13.5	0.1324			
18	17	22	0.1078			
20	19	21	0.1029			
25	22.5	44	0.0863			
30	27.5	38.5	0.0755	0.024	0.020	99.799
35	32.5	37.5	0.0735			
40	37.5	37	0.0725			
45	42.5	37	0.0725			
50	47.5	36	0.0706			
55	52.5	34	0.0667			
60	57.5	33	0.0647			
65	62.5	31	0.0608			
70	67.5	30	0.0588	0.016	0.013	99.856
75	72.5	29.5	0.0578			
80	77.5	29.5	0.0578			
85	82.5	29	0.0569			
90	87.5	29	0.0569	0.012	0.010	99.899
95	92.5	29.5	0.0578			
100	97.5	30	0.0588			
105	102.5	29	0.0569			
110	107.5	29	0.0589			

กราฟความเข้มข้นระหว่างเพอเมอเรตที่กักและเวลา
(Conc. 10 g/l, ΔP_m 0.22 bar, v 0.06 m/s)



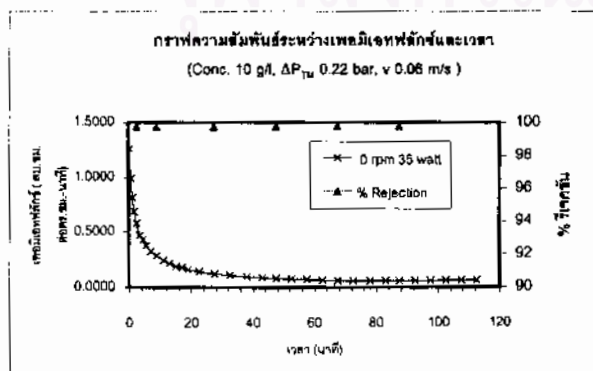
วันที่ 6/9/43
การทดลองที่ 110

ความดันคอมเพรสเซอร์	0.22 บาร์	จำนวนทรานสดิวเซอร์	1 ตัว
ความเร็วสายป้อน	0.08 เมตรต่อวินาที	ความถี่คลื่นเหนือเสียง	28 กิโลเฮิรตซ์
ความเข้มข้น	10 กรัมต่อลิตร	กำลังคลื่นเหนือเสียง	35 วัตต์
ความเร็วรอบหมุน	0 รอบต่อนาที		

ค่าความต้านทานการกรอง

permeate pure water (membrane)	2.47	ml/s	$R_m =$	1.1762E+09	1/cm	
permeate pure water (membrane+fouling+calc)	0.24	ml/s	$R_f =$	1.2089E+10	1/cm	$R_p = 1.0846E+10$ 1/cm
permeate pure water (membrane+fouling)	2.33	ml/s	$R_p + R_m =$	1.2434E+09	1/cm	$R_p = 6.7213E+07$ 1/cm

ช่วงเวลา (min)	เวลาที่	ปริมาตร(ml)	เพอมีเจฟลักซ์ (cm ³ /cm ² *min)	ค่าจางลบปกติ	ความเข้มข้นเพอมีเจฟ (g/l)	% รีเจกชัน
0.5	0.25	64.5	1.2647			
1	0.75	50.5	0.9902			
1.5	1.25	41.5	0.8137			
2	1.75	35	0.6863			
3	2.5	59	0.5784	0.027	0.023	99.773
4	3.5	48	0.4706			
5	4.5	44	0.4314			
6	5.5	36.5	0.3775			
8	7	66	0.3235			
10	9	58	0.2843	0.029	0.024	99.757
12	11	50	0.2451			
14	13	44	0.2157			
16	15	38	0.1863			
18	17	36	0.1765			
20	19	32.5	0.1593			
25	22.5	73.5	0.1441			
30	27.5	63	0.1235	0.029	0.024	99.757
35	32.5	56	0.1098			
41	38	59	0.0964			
45	43	36	0.0882			
50	47.5	42	0.0824	0.025	0.021	99.790
55	52.5	39	0.0765			
60	57.5	36	0.0706			
65	62.5	32	0.0627			
70	67.5	30	0.0588	0.026	0.022	99.782
75	72.5	30	0.0588			
81	78	36	0.0568			
85	83	24	0.0588			
90	87.5	30	0.0588	0.022	0.018	99.815
95	92.5	30	0.0588			
100	97.5	30	0.0588			
105	102.5	31	0.0608			
110	107.5	31	0.0608			
115	112.5	31	0.0608			



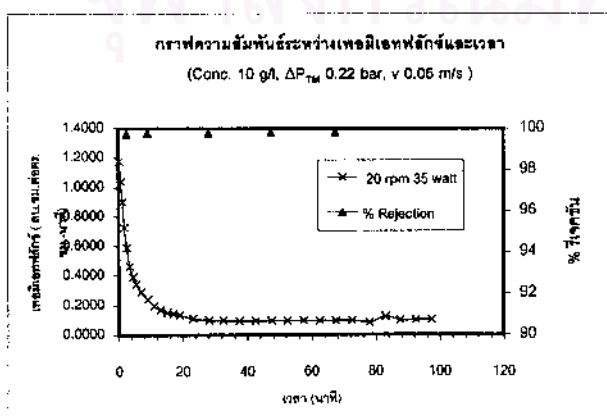
วันที่ 7/9/43
การทดลองที่ 111

ความดันคอมเมียมัน	0.22 บาร์	จำนวนทรานส์เวิร์ท	1	ตัว
ความเร็วสายป้อน	0.06 เมตรต่อวินาที	ความดันคั้นเหนือเสียง	28	กิโลเฮิรตซ์
ความเร็วคลื่น	10 กิโลเมตรต่อชั่วโมง	กำลังคั้นเหนือเสียง	35	วัตต์
ความเร็วรอบหมุน	20 รอบต่อนาที			

ค่าความต้านทานการกรอง

permeate pure water (membrane)	2.27	m/s	$R_m =$	1.2800E+09	1/cm	
permeate pure water (membrane+fouling+cake)	0.41	m/s	$R_f =$	7.0194E+09	1/cm	$R_e = 5.6268E+09$ 1/cm
permeate pure water (membrane+fouling)	2.08	m/s	$R_p + R_m =$	1.3927E+09	1/cm	$R_p = 1.1264E+09$ 1/cm

ช่วงเวลา (min)	นาทีที่	ปริมาตร(ml)	เพอมีเอทฟลักซ์ (cm ³ /cm ² ·min)	ค่าจากสมการโคตร	ความเข้มข้นเพอมีเอท(g/l)	% รีเจคชัน
0.5	0.25	60	1.1765			
1	0.75	53	1.0392			
1.5	1.25	46	0.8020			
2	1.75	37	0.7255			
3	2.5	60	0.5882	0.031	0.026	99.740
4	3.5	47	0.4608			
5	4.5	40	0.3922			
6	5.5	35	0.3431			
8	7	59	0.2892			
10	9	49	0.2402	0.024	0.020	99.799
12	11	40	0.1961			
14	13	35	0.1716			
16	15	31	0.1520			
18	17	29	0.1422			
20	19	27.5	0.1348			
26	23	66	0.1111			
30	28	41	0.1005	0.025	0.021	99.790
35	32.5	50	0.0980			
40	37.5	49	0.0961			
45	42.5	49	0.0961			
50	47.5	49	0.0961	0.022	0.018	99.815
55	52.5	49	0.0961			
60	57.5	49	0.0961			
85	82.5	49	0.0961			
70	67.5	49	0.0961	0.021	0.018	99.824
75	72.5	50	0.0980			
81	78	52	0.0850			
85	83	51	0.1250			
90	87.5	51	0.1000			
95	92.5	52	0.1020			
100	97.5	52	0.1020			



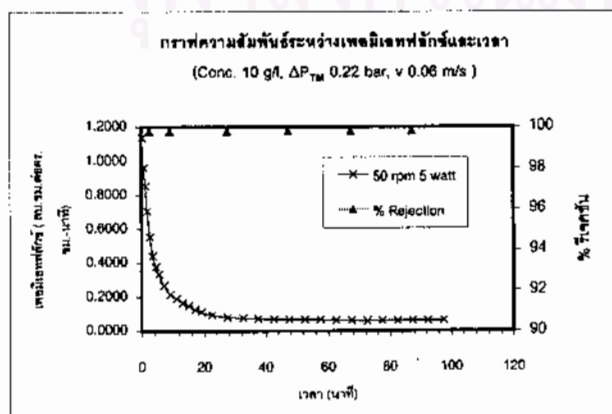
วันที่ 7/9/43
การทดลองที่ 112

ความดันกรองเมมเบรน	0.22 บาร์	จำนวนทรานสดิวเซอร์	1 ตัว
ความเร็วสายป้อน	0.06 เมตรต่อวินาที	ความดันคั่นหน่วยเสียง	28 กิโลนิวตัน
ความเข้มข้น	10 กรัมต่อลิตร	กำลังคั่นหน่วยเสียง	5 วัตต์
ความถี่รอบหมุน	50 รอบต่อนาที		

ค่าความต้านทานการกรอง

permeate pure water (membrane) 2.27 ml/s $R_m = 1.2800E+09$ 1/cm
 permeate pure water (membrane+fouling+cake) 0.13 ml/s $R_f = 2.2608E+10$ 1/cm $R_c = 2.1226E+10$ 1/cm
 permeate pure water (membrane+fouling) 2.10 ml/s $R_p+R_m = 1.3816E+09$ 1/cm $R_p = 1.0159E+08$ 1/cm

ช่วงเวลา (min)	นาฬิกา	ปริมาตร(ml)	เพอมีเทฟลักซ์ (cm ³ /cm ² *min)	ค่าจากสเปกโตร	ความเข้มข้นเพอมีเทฟ (g/l)	% รีเจกชัน
0.5	0.25	56	1.1373			
1	0.75	49	0.9008			
1.5	1.25	43.5	0.8529			
2	1.75	36	0.7059			
3	2.5	56.5	0.5539	0.026	0.022	99.782
4	3.5	45	0.4412			
5	4.5	38.5	0.3775			
6	5.5	34	0.3333			
8	7	55	0.2696			
10	9	44	0.2157	0.026	0.022	99.782
12	11	39	0.1912			
14	13	33.5	0.1642			
16	15	30	0.1471			
18	17	26	0.1275			
20	19	23	0.1127			
25	22.5	48	0.0941			
30	27.5	41.5	0.0814	0.024	0.020	99.799
35	32.5	38.5	0.0755			
40	37.5	37	0.0725			
45	42.5	36	0.0706			
50	47.5	35	0.0686	0.023	0.019	99.807
55	52.5	35	0.0686			
60	57.5	34	0.0667			
65	62.5	32	0.0627			
70	67.5	31	0.0608	0.02	0.017	99.832
75	72.5	30	0.0588			
80	77.5	30.5	0.0598			
85	82.5	30.5	0.0598			
90	87.5	30.5	0.0598	0.02	0.017	99.832
95	92.5	30.5	0.0598			
100	97.5	30.5	0.0598			



วันที่ 6/9/43

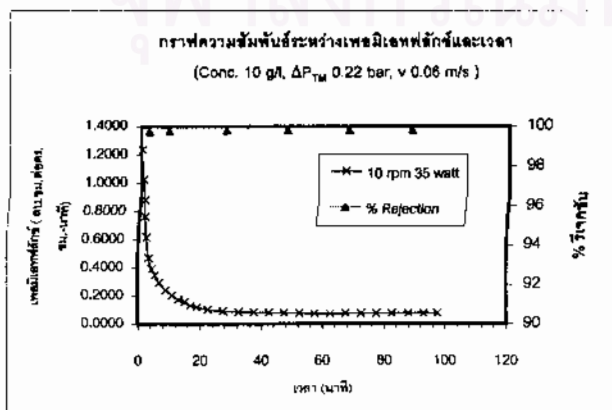
การทดลองที่ 114

ความดันคร่อมเยื่อเมม	0.22 บาร์	จำนวนทวนสวิตเซอร์	1 ตัว
ความเร็วสายป้อน	0.06 เมตรต่อวินาที	ความลึกตะกอนเหนือเยื่อ	28 นิ้ว
ความเร็วหมุน	10 กิ่งต่อวินาที	ค่าคงที่ในเยื่อเมม	35 วัตต์
ความเร็วรอบหมุน	10 รอบต่อนาที		

ค่าความต้านทานการกรอง

permeate pure water (membrane)	2.23	ml/s	$R_m =$	$1.2991E+09$	1/cm
permeate pure water (membrane+fouling+calc)	0.38	ml/s	$R_f =$	$7.5688E+09$	1/cm
permeate pure water (membrane+fouling)	2.07	ml/s	$R_p + R_m =$	$1.4039E+09$	1/cm

ช่วงเวลา (min)	นาฬิกา	ปริมาตร(ml)	เพอเมิเจฟลักซ์ (cm ³ /cm ² ·min)	ค่าจากสเปกโตร	ความเข้มข้นเพอเมิเจฟ (g/l)	% รีเจกชัน
0.5	0.25	63	1.2353			
1	0.75	52.5	1.0294			
1.5	1.25	45	0.8824			
2	1.75	39	0.7647			
3	2.5	63	0.6176	0.029	0.024	99.757
4	3.5	48	0.4706			
5	4.5	40	0.3922			
6	5.5	35.5	0.3480			
8	7	60	0.2941			
10	9	49	0.2402	0.028	0.023	99.765
12	11	42	0.2059			
14	13	35.5	0.1740			
16	15	32	0.1569			
18	17	27	0.1324			
20	19	24.5	0.1201			
25	22.5	52.5	0.1029			
30	27.5	46	0.0902	0.022	0.018	99.815
35	32.5	44	0.0863			
40	37.5	43	0.0843			
45	42.5	42	0.0824			
50	47.5	41	0.0804	0.019	0.016	99.841
55	52.5	40	0.0784			
60	57.5	38.5	0.0755			
65	62.5	37.5	0.0735			
70	67.5	38	0.0745	0.019	0.016	99.841
75	72.5	38	0.0745			
80	77.5	38.5	0.0755			
85	82.5	40	0.0784			
91	88	47.5	0.0776	0.017	0.014	99.857
95	93	32	0.0784			
100	97.5	40	0.0784			



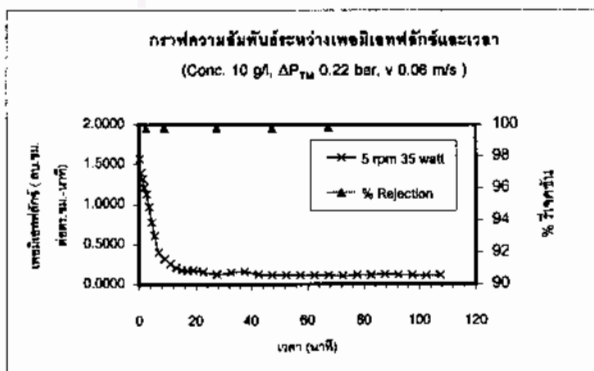
วันที่ 12/9/43
การทดลองที่ 115

ความดันคอมเพรสเซอร์	0.22 บาร์	จำนวนความเค็มของ	1	ตัว
ความเร็วสายป้อน	0.06 เมตรต่อวินาที	ความเค็มของน้ำดื่ม	28	กิโลลิตร
ความเร็วหมุน	10 กิโลเมตรต่อชั่วโมง	กำลังขับเคลื่อน	35	วัตต์
ความเร็วรอบหมุน	5 รอบต่อวินาที			

ค่าความต้านทานการกรอง

permeate pure water (membrane)	2.93	ml/s	$R_m =$	$9.8910E+08$	1/cm	
permeate pure water (membrane+fouling+cake)	2.00	ml/s	$R_f =$	$1.4507E+09$	1/cm	$R_c = 2.6645E+08$ 1/cm
permeate pure water (membrane+fouling)	2.45	ml/s	$R_p = R_m =$	$1.1842E+09$	1/cm	$R_p = 1.9513E+08$ 1/cm

ช่วงเวลา (min)	เวลาที่	ปริมาตร(ml)	เพอมีเซฟลิตซ์ (cm ³ /cm ² *min)	ค่าจากสเปกโตร	ความเข้มข้นเพอมีเซฟ(g/l)	%รีเจกชัน
0.5	0.25	80	1.5686			
1	0.75	71	1.3922			
1.5	1.25	67	1.3137			
2	1.75	62	1.2157			
3	2.5	115	1.1275	0.028	0.023	99.765
4	3.5	99	0.9708			
5	4.5	79	0.7745			
6	5.5	62.5	0.6127			
8	7	82	0.4020			
10	9	66	0.3235	0.025	0.021	99.790
12	11	53	0.2598			
14	13	44	0.2157			
16	15	38	0.1863			
18	17	36	0.1765			
20	19	36	0.1765			
25	22.5	82	0.1608			
30	27.5	65	0.1275	0.023	0.019	99.807
35	32.5	79	0.1549			
40	37.5	84	0.1647			
45	42.5	64	0.1255			
50	47.5	60	0.1176	0.03	0.025	99.748
55	52.5	60	0.1176			
60	57.5	57	0.1118			
65	62.5	56	0.1098			
70	67.5	57	0.1118	0.02	0.017	99.832
75	72.5	54	0.1059			
80	77.5	57	0.1118			
85	82.5	58.5	0.1147			
90	87.5	64	0.1255			
95	92.5	80	0.1176			
100	97.5	67	0.1118			
105	102.5	55	0.1078			
110	107.5	57	0.1118			



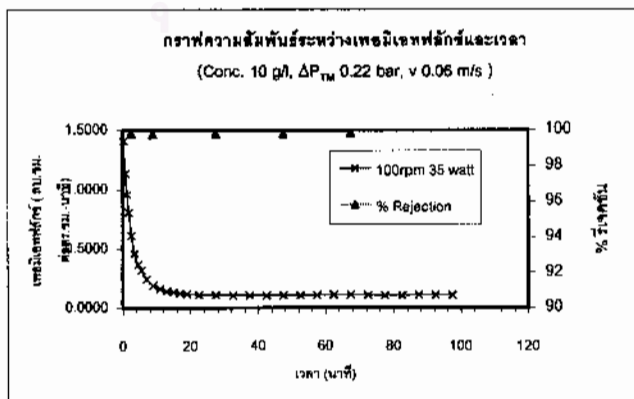
วันที่ 12/9/43
การทดลองที่ 118

ความดันรวมเยื่อเมมเบรน	0.22 บาร์	จำนวนทรานส์มิเตอร์	1 ตัว
ความเร็วสายป้อน	0.08 เมตรต่อวินาที	ความถ่วงสัมพัทธ์	28 กิโลเฮิร์ตซ์
ความเร็วรอบ	10 รอบต่อวินาที	กำลังขับเคลื่อน	35 วัตต์
ความเร็วรอบหมุน	100 รอบต่อนาที		

ค่าความต้านทานการกรอง

permeate pure water (membrane)	2.77 ml/s	$R_m =$	$1.0487E+09$ 1/cm	
permeate pure water (membrane+fouling+cake)	0.32 ml/s	$R_f =$	$9.0668E+09$ 1/cm	$R_p = 7.7678E+09$ 1/cm
permeate pure water (membrane+fouling)	2.23 ml/s	$R_p + R_m =$	$1.2991E+09$ 1/cm	$R_p = 2.5043E+08$ 1/cm

ช่วงเวลา (min)	นาฬิกา	ปริมาตร(ml)	เพอมีเจฟลักซ์ (cm ³ /cm ² *min)	ค่าจากสเปกโตร	ความเข้มข้นเพอมีเจท(g/l)	% รีเจกชัน
0.5	0.25	72	1.4118			
1	0.75	58	1.1373			
1.5	1.25	49	0.9608			
2	1.75	41.5	0.8137			
3	2.5	63	0.8176	0.022	0.018	99.815
4	3.5	47.5	0.4657			
5	4.5	38	0.3725			
6	5.5	33	0.3235			
8	7	50.5	0.2475			
10	9	40	0.1961	0.026	0.022	99.782
12	11	34	0.1667			
14	13	30	0.1471			
16	15	28	0.1373			
18	17	26	0.1275			
20	19	25	0.1225			
25	22.5	58.5	0.1147			
30	27.5	57	0.1118	0.023	0.019	99.807
35	32.5	56	0.1096			
40	37.5	55	0.1078			
45	42.5	54	0.1059			
50	47.5	54	0.1059	0.021	0.018	99.824
55	52.5	54	0.1059			
60	57.5	55	0.1078			
65	62.5	57	0.1118			
70	67.5	57	0.1118	0.018	0.015	99.849
75	72.5	55	0.1078			
80	77.5	54	0.1059			
85	82.5	54	0.1059			
90	87.5	55	0.1078			
95	92.5	55	0.1078			
100	97.5	55	0.1078			



วันที่ 12/9/43
การทดลองที่ 117

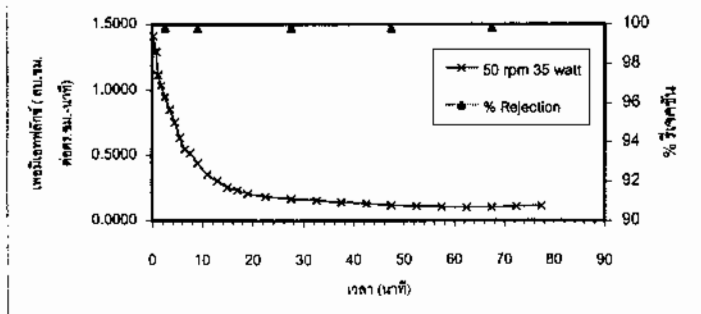
ความดันก่อนเยื่อแผ่น	0.22 บาร์	จำนวนทรานสเคิลเลอร์	1 ตัว
ความเร็วสายป้อน	0.06 เมตรต่อวินาที	ความถี่คลื่นเหนือเสียง	28 กิโลเฮิรตซ์
ความเข้มข้น	10 กรัมต่อลิตร	กำลังคลื่นเหนือเสียง	35 วัตต์
ความเร็วรอบหมุน	50 รอบต่อวินาที		

ค่าความต้านทานการกรอง

permeate pure water (membrane)	2.67 ml/s	$R_m =$	$1.0680E+09$ 1/cm		
permeate pure water (membrane+fouling+cake)	0.63 ml/s	$R_f =$	$4.6298E+09$ 1/cm	$R_c =$	$2.3393E+09$ 1/cm
permeate pure water (membrane+fouling)	1.27 ml/s	$R_p + R_m =$	$2.2905E+09$ 1/cm	$R_p =$	$1.2025E+09$ 1/cm

ช่วงเวลา (min)	เวลาที่	ปริมาตร(ml)	เพอมีเจฟลักซ์ (cm ³ /cm ² *min)	ค่าจากสเปกโตร	ความเข้มข้นเพอมีเจท(g/l)	%รีเจคชัน
0.5	0.25	72	1.4118			
1	0.75	66	1.2941			
1.5	1.25	57	1.1176			
2	1.75	53	1.0392			
3	2.5	97	0.9510	0.022	0.018	99.815
4	3.5	87	0.8529			
5	4.5	77	0.7549			
6	5.5	65	0.6373			
7	6.5	56	0.5490			
8	7.5	53	0.5196			
10	9	90	0.4412	0.025	0.021	99.790
12	11	72	0.3529			
14	13	62	0.3039			
16	15	52	0.2549			
18	17	48	0.2353			
20	19	43	0.2108			
25	22.5	95	0.1863			
30	27.5	86	0.1686	0.025	0.021	99.790
36	32.5	79	0.1549			
40	37.5	72	0.1412			
45	42.5	67	0.1314			
50	47.5	60	0.1176	0.025	0.021	99.790
55	52.5	56.5	0.1108			
60	57.5	53.5	0.1049			
65	62.5	51	0.1000			
70	67.5	51	0.1000	0.019	0.016	99.841
75	72.5	58	0.1098			
80	77.5	57	0.1118			

กราฟความเข้มข้นระหว่างเพอมีเจฟลักซ์และเวลา
(Conc. 10 g/l, ΔP_{TM} 0.22 bar, v 0.06 m/s)



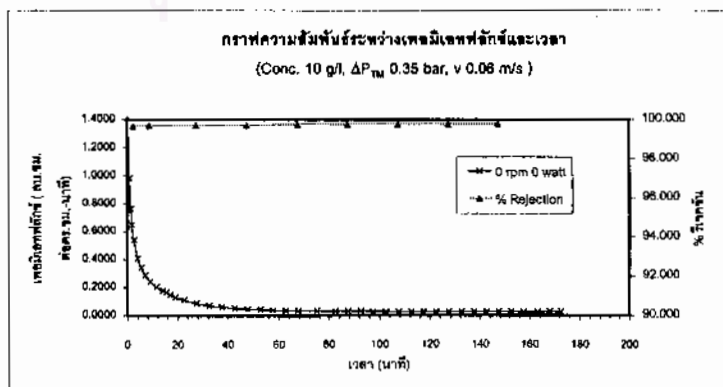
วันที่ 2/10/43
การทดลองที่ 130

ความเข้มข้นเริ่มต้น	0.35	บาร์	จำนวนรอบการล้าง	0	ตัว
ความเร็วของปั๊ม	0.08	เมตรต่อวินาที	ความดันคั่นหน่วยล้าง	0	กิโลวัตต์
ความเข้มข้น	10	กรัมต่อลิตร	ค่าคงที่ในหน่วยล้าง	0	วินาที
ความเร็วรอบหมุน	0	รอบต่อวินาที			

ค่ารวมตัวหน่วยการกรอง

permeate pure water (membrane)	4.02	m/s	R_m	=	1.1492E+09	1/cm	
permeate pure water (membrane+fouling+cake)	0.04	m/s	R_f	=	1.1078E+11	1/cm	$R_f = 1.0946E+11$ 1/cm
permeate pure water (membrane+fouling)	3.90	m/s	$R_m + R_f$	=	1.3168E+09	1/cm	$R_f = 1.6964E+08$ 1/cm

ช่วงเวลา (min)	เวลาที่	ปริมาตร(m)	เพอเมิเตอร์ที่กัก (cm ³ /min ² /min)	ค่าคงที่ในหน่วยล้าง	ความเข้มข้น หน่วย (g/l)	ร้อยละ
0.5	0.25	79	1.5490			
1	0.75	50	0.9604			
1.5	1.25	38	0.7647			
2	1.75	33	0.6471			
3	2.5	65	0.5362	0.039	0.033	98.673
5	4	83.5	0.4063			
6	5.5	35	0.3431			
8	7	58	0.2562			
10	9	48	0.2402	0.035	0.029	99.706
13	11.5	82	0.2028			
15	14	36	0.1786			
16	15.5	17	0.1667			
18	17	30	0.1471			
20	19	27	0.1324			
25	22.5	56.5	0.1108			
30	27.5	45	0.0882	0.034	0.029	99.715
35	32.5	36.5	0.0716			
40	37.5	30.5	0.0598			
45	42.5	28.5	0.0520			
50	47.5	24	0.0471	0.033	0.028	99.723
55	52.5	21	0.0412			
60	57.5	19.5	0.0382			
65	62.5	18	0.0353			
70	67.5	17.5	0.0343	0.027	0.023	99.773
80	75	34	0.0333			
85	82.5	15.5	0.0304			
90	87.5	15.5	0.0304	0.026	0.022	99.782
95	92.5	15	0.0294			
100	97.5	14	0.0275			
105	102.5	14	0.0275			
110	107.5	13.5	0.0265	0.026	0.022	99.782
115	112.5	13.5	0.0265			
120	117.5	13.5	0.0265			
125	122.5	13.25	0.0260			
130	127.5	13	0.0255	0.026	0.022	99.782
135	132.5	13	0.0255			
140	137.5	13	0.0255			
145	142.5	12.75	0.0250			
150	147.5	12.5	0.0245	0.023	0.018	99.807
155	152.5	12.5	0.0245			
160	157.5	12.25	0.0240			
168	163	14.5	0.0237			
170	166	10.5	0.0257			
175	172.5	12.5	0.0245			



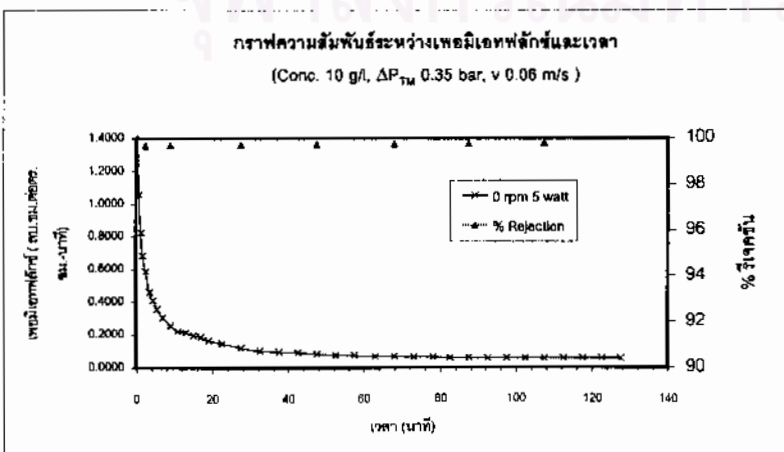
วันที่ 3/10/43
การทดลองที่ 136

ความดันคอมเพรสเซอร์	0.35 บาร์	จำนวนทางเดินยาว	1 ตัว
ความเข้มข้นของ	0.06 เมกดาลินาที	ความดันคั่นของปั๊ม	28 กิโลกรัม
ความเข้มข้น	10 กรัมต่อลิตร	กำลังคั่นของปั๊ม	5 วัตต์
ความเร็วรอบหมุน	0 รอบต่อนาที		

ค่าความดันรวมการกรอง

permeate pure water (membrane)	4.20 ml/s	$R_m =$	$1.0960E+09$ 1/cm	
permeate pure water (membrane+fouling+cake)	0.11 ml/s	$R_f =$	$4.2907E+10$ 1/cm	$R = 4.1472E+10$ 1/cm
permeate pure water (membrane+fouling)	4.07 ml/s	$R_p + R_m =$	$1.1350E+09$ 1/cm	$R_p = 3.6033E+07$ 1/cm

ช่วงเวลา (min)	นาฬิกา	ปริมาตร(ml)	เกลือที่เหลือทิ้ง (cm ³ cm ² /min)	ค่าของสเปกโตร	ความเข้มข้น เกลือ (g/l)	% รีเจกชัน
0.5	0.25	90	1.7647			
1	0.75	54	1.0588			
1.5	1.25	42	0.8235			
2	1.75	35	0.8863			
3	2.5	60	0.5882	0.037	0.031	99.690
4	3.5	47	0.4696			
5	4.5	42	0.4118			
6	5.0	36.5	0.3578			
8	7	62	0.3039			
10	9	52	0.2549	0.035	0.029	99.706
12	11	45	0.2206			
14	13	44	0.2157			
16	15	40	0.1961			
18	17	38	0.1863			
20	19	33.5	0.1842			
25	22.5	75	0.1471			
30	27.5	62	0.1216	0.033	0.028	99.723
35	32.5	52	0.1020			
40	37.5	49	0.0961			
45	42.5	45.5	0.0892			
50	47.5	42	0.0824	0.03	0.025	99.748
55	52.5	38	0.0765			
60	57.5	37.5	0.0735			
66	63	42	0.0688			
70	68	28	0.0688	0.03	0.025	99.748
76	73	40	0.0654			
80	78	26	0.0637			
85	82.5	31	0.0608			
90	87.5	30	0.0589	0.027	0.023	99.773
95	92.5	29	0.0569			
100	97.5	28.5	0.0559			
105	102.5	29	0.0569			
110	107.5	29	0.0569	0.024	0.020	99.799
115	112.5	29	0.0569			
120	117.5	29	0.0569			
125	122.5	28.5	0.0559			
130	127.5	29	0.0569			



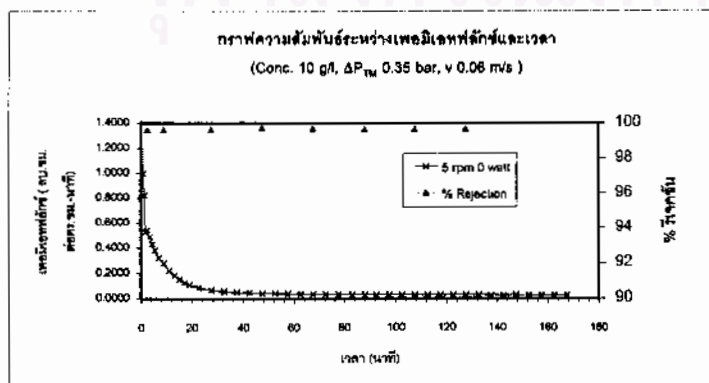
วันที่ 3/10/43
 ภาพแสดงที่ 129

ความเข้มข้นเริ่มต้น	0.35	กรัม	จำนวนรวมตัวของ	0	ตัว
ความสะอาดของ	0.06	เมตร/วินาที	ความเข้มข้นของ	0	กรัม/ลิตร
ความเข้มข้น	10	กรัม/ลิตร	จำนวนรวมตัวของ	0	ตัว
ความยาวของ	5	เมตร/วินาที			

ค่าพารามิเตอร์การกรอง

permeate pure water (membrane)	4.20	mls	$R_m =$	$1.0990E+09$	1/cm
permeate pure water (membrane + fouling + cake)	0.04	mls	$R_f =$	$1.0652E+11$	1/cm
permeate pure water (membrane + fouling)	4.00	mls	$R_m + R_f =$	$1.1540E+09$	1/cm

ระยะเวลา (นาที)	น้ำหนัก	ปริมาณ(กรัม)	พอลิเมอร์ที่กรอง (mg/cm ² /min)	ค่าความดันตก	ความเข้มข้น (mg/l)	ร้อยละ
0.5	0.25	87	1.7059			
1	0.75	51	1.0000			
1.5	1.25	42	0.8235			
2	1.75	27	0.5294			
3	2.5	55.5	0.5441	0.044	0.037	99.631
4	3.5	50	0.4902			
5	4.5	44	0.4314			
6	5.5	38	0.3824			
8	7	36	0.3235			
10	9	57	0.2794	0.044	0.037	99.631
12	11	45	0.2206			
14	13	37.5	0.1836			
15	15	31	0.1520			
18	17	26	0.1275			
20	19	22.6	0.1103			
25	22.5	44	0.0863			
30	27.5	34	0.0667	0.042	0.035	99.648
35	32.5	28	0.0549			
40	37.5	25	0.0490			
45	42.5	24	0.0471			
50	47.5	21	0.0412	0.031	0.026	99.740
55	52.5	20.5	0.0402			
60	57.5	19.5	0.0382			
65	62.5	18.5	0.0363			
70	67.5	18	0.0353	0.034	0.029	99.715
75	72.5	17.5	0.0343			
80	77.5	17	0.0333			
86	83	19.5	0.0319			
90	88	12.5	0.0306	0.028	0.032	99.681
95	92.5	15.5	0.0304			
100	97.5	15	0.0294			
105	102.5	15	0.0294			
110	107.5	14.75	0.0289	0.037	0.031	99.690
115	112.5	14.6	0.0284			
120	117.5	14.5	0.0284			
125	122.5	14.25	0.0279			
130	127.5	14	0.0275	0.037	0.031	99.690
135	132.5	14	0.0275			
140	137.5	13.5	0.0265			
145	142.5	13.5	0.0265			
150	147.5	13.5	0.0265			
155	152.5	13	0.0255			
160	157.5	13	0.0255			
165	162.5	13	0.0255			
170	167.5	13	0.0255			



วันที่ 5/10/43

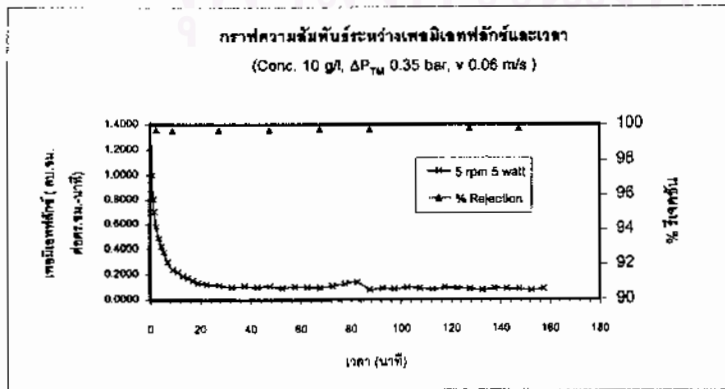
การทดลองที่ 140

ความเค็มเกลือซีเมน	0.35	นาซี	จำนวนทวนตัวเซฟ	1	ตัว
ความเร็วคาลอ้อน	0.06	เมตรต่อวินาที	ความถี่คลื่นเหนือเสียง	28	กิโลเฮิรตซ์
ความเข้มข้น	10	กรัมต่อลิตร	กำลังคลื่นเหนือเสียง	5	วัตต์
ความถี่รอบหมุน	5	รอบต่อวินาที			

ค่าความต้านทานการไหล

permeate pure water (membrane)	3.87	m/s	$R_m =$	1.1937E+09	1/cm	
permeate pure water (membrane+fouling+cake)	0.19	m/s	$R_f =$	2.4294E+10	1/cm	$R_t = 2.3046E+10$ 1/cm
permeate pure water (membrane+fouling)	3.70	m/s	$R_m + R_f =$	1.2476E+09	1/cm	$R_t = 5.3772E+07$ 1/cm

ช่วงเวลา (min)	เวลาที่	ปริมาตร(ml)	เพอมีเจทฟลักซ์ (cm ³ /cm ² /min)	ค่าจลนพลศาสตร์	ความเข้มข้น เพอมีเจท (g/l)	% ฟื้นฟู
0.5	0.25	84	1.8471			
1	0.75	51	1.0000			
1.5	1.25	41	0.8039			
2	1.75	38	0.7069			
3	2.5	58.5	0.5833	0.035	0.029	98.706
4	3.5	50	0.4902			
5	4.5	43.5	0.4265			
6	5.5	38.5	0.3775			
6	7	61	0.2990			
10	9	48	0.2402	0.041	0.034	99.656
12	11	45	0.2205			
14	13	39	0.1912			
16	15	36	0.1785			
18	17	31	0.1520			
20	19	27	0.1324			
25	22.5	52	0.1216			
30	27.5	59	0.1167	0.039	0.033	99.673
35	32.5	50	0.0980			
40	37.5	55	0.1078			
45	42.5	49	0.0861			
50	47.5	55	0.1078	0.036	0.030	99.666
55	52.5	46	0.0902			
60	57.5	53	0.1039			
65	62.5	49	0.0961			
70	67.5	48	0.0941	0.032	0.027	99.732
75	72.5	55	0.1078			
80	77.5	84	0.1285			
85	82.5	70	0.1073			
90	87.5	40	0.0784	0.03	0.025	99.748
95	92.5	46	0.0882			
100	97.5	42	0.0824			
105	102.5	48	0.0941			
110	107.5	45	0.0882			
115	112.5	40	0.0784			
120	117.5	47	0.0822			
125	122.5	45	0.0882			
130	127.5	42	0.0824	0.026	0.022	99.762
135	132.5	38	0.0745			
140	137.5	44	0.0863			
145	142.5	43	0.0843			
150	147.5	40	0.0784	0.027	0.023	99.773
155	152.5	37	0.0725			
160	157.5	43	0.0843			



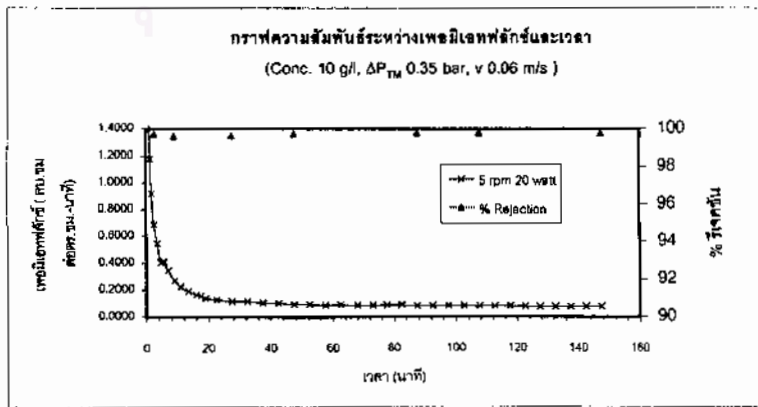
วันที่ 6/10/43
การทดลองที่ 141

ความดันคอมเพรสเซอร์	0.35	บาร์	จำนวนรอบฟีดแบ็ค	1	ตัว
ความเร็วสายพาน	0.06	เมตรต่อนาที	ความถี่สั่นเหนี่ยวนำ	28	กิโลเฮิรตซ์
ความถี่สั่น	10	กรัมต่อลิตร	ค่าคงที่ในสมการ	20	วินาที
ความเร็วรอบหมุน	5	รอบต่อนาที			

ค่าความต้านทานการกรอง

permeate pure water (membrane)	4.57	m/s	$R_m =$	1.0108E+09	1/cm	
permeate pure water (membrane+fouling+cake)	0.13	m/s	$R_f =$	3.641E+10	1/cm	$R_t = 3.5252E+10$ 1/cm
permeate pure water (membrane+fouling)	3.88	m/s	$R_f + R_m =$	1.1886E+09	1/cm	$R_t = 1.7786E+08$ 1/cm

ช่วงเวลา (min)	ปริมาตร	ปริมาตร(มล)	เลขมิเตอร์ฟลักซ์ (cm ³ /cm ² /min)	ค่าจากสมการ	ความเข้มข้น เพลอ เลท(g/l)	พิจเจกซ์
0.5	0.25	110	2.1569			
1	0.75	86	1.7265			
1.5	1.25	60	1.1765			
2	1.75	47	0.8218			
3	2.6	70	0.8883	0.032	0.027	99.732
4	3.6	56	0.6490			
5	4.6	41.5	0.4089			
6	5.5	42	0.4118			
8	7	71	0.3480			
10	9	55.5	0.2721	0.042	0.035	99.648
12	11	46	0.2255			
16	13.5	58.5	0.1912			
17	16	34	0.1887			
18	17.5	18	0.1589			
20	19	29	0.1422			
25	22.5	65.5	0.1284			
30	27.5	60	0.1176	0.04	0.034	99.654
35	32.5	60	0.1176			
40	37.5	54	0.1069			
45	42.5	52	0.1020			
50	47.5	48	0.0941	0.031	0.026	99.743
55	52.5	48	0.0941			
60	57.5	45	0.0882			
65	62.5	46	0.0902			
71	68	53	0.0866			
75	73	35	0.0858			
80	77.5	45	0.0882			
85	82.5	45	0.0882			
90	87.5	43	0.0843	0.022	0.018	99.815
95	92.5	43	0.0843			
100	97.5	43	0.0843			
105	102.5	43	0.0843			
110	107.5	41.5	0.0814	0.022	0.018	99.815
115	112.5	41.5	0.0814			
120	117.5	41	0.0804			
125	122.5	40	0.0784			
130	127.5	39	0.0765			
135	132.5	39.5	0.0775			
140	137.6	39	0.0765			
145	142.5	40	0.0784			
150	147.5	40	0.0784	0.026	0.022	99.782



วันที่ 7/10/43
ภาควิชา 142

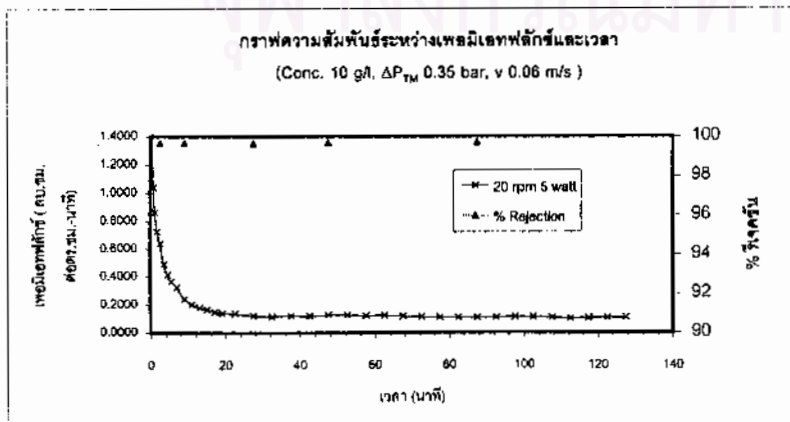
ความดันคอมโพเนนต์	0.35	บาร์	จำนวนความดันคอมโพเนนต์	1	ตัว
ความเร็วสายพาน	0.06	เมตรต่อวินาที	ความถี่ของมอเตอร์	28	กิโลวัตต์
ความเข้มข้น	10	กรัมต่อลิตร	กำลังขับเคลื่อนมอเตอร์	6	วัตต์
ความยาวของท่อ	20	เซนติเมตร			

ค่าความต้านทานการกรอง

permeate pure water (membrane)	4.42	ml/s	$R_m =$	$1.0451E+09$	1/cm
permeate pure water (membrane+fouling+cake)	0.22	ml/s	$R_f =$	$2.1304E+10$	1/cm
permeate pure water (membrane+fouling)	3.47	ml/s	$R_p + R_m =$	$1.3315E+09$	1/cm

ช่วงเวลา (min)	นาฬิกา	ปริมาตร(ml)	เฟรมเนื้อเค้ก (cm ³ /cm ² /min)	ค่าจากกราฟ	ความเข้มข้น (กรัม/ลิตร)	% รีเจกชัน
0.5	0.25	87	1.7059			
1	0.75	53	1.0362			
1.5	1.25	44	0.8627			
2	1.75	37	0.7255			
3	2.5	65.5	0.6422	0.036	0.032	99.581
4	3.5	50	0.4902			
5	4.5	42.5	0.4167			
6	5.5	37.5	0.3676			
8	7	57	0.3284			
10	9	48	0.2402	0.038	0.032	99.581
12	11	41	0.2010			
14	13	37	0.1814			
16	15	34	0.1667			
18	17	30.5	0.1495			
20	19	29	0.1422			
25	22.5	70	0.1373			
30	27.5	61.5	0.1206	0.041	0.034	99.656
35	32.5	50	0.1175			
40	37.5	63	0.1235			
45	42.5	61	0.1195			
50	47.5	65	0.1275	0.033	0.028	99.723
55	52.5	65	0.1275			
60	57.5	63	0.1235			
65	62.5	64	0.1255			
70	67.5	60	0.1176			
75	72.5	58.5	0.1147			
80	77.5	57	0.1118			
85	82.5	56	0.1098			
90	87.5	55.5	0.1088	0.031	0.026	99.740
95	92.5	56.5	0.1106			
100	97.5	57	0.1118			
105	102.5	56	0.1098			
110	107.5	55	0.1078			
115	112.5	52	0.1020			
120	117.5	54	0.1058			
125	122.5	55.5	0.1088			
130	127.5	55	0.1078			

กราฟความเข้มข้นระหว่างเฟรมเนื้อเค้กและเวลา
(Conc. 10 g/l, ΔP_{TM} 0.35 bar, v 0.06 m/s)



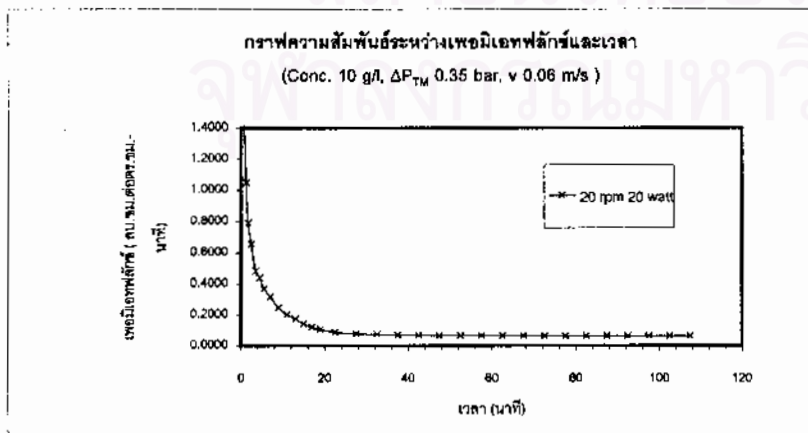
วันที่ 8/10/43
ภาวทดลองที่ 143

ความดันคร่อมเยื่อเมมเบรน	0.35	บาร์	จำนวนรอบการตีวงรี	1	ชั่วโมง
ความเข้มข้นของป้อน	0.08	เมกซ์เปอร์เซ็นต์	ความเค็มที่แน่นอน	26	กรัมลิตร
ความเข้มข้น	10	กรัมต่อลิตร	กำลังดันเหนือเยื่อ	20	วัตต์
ความเร็วรอบมอเตอร์	20	รอบต่อนาที			

ค่าความต้านทานการกรอง

permeate pure water (membrane)	4.18	m/s	$R_m =$	$1.1034E+09$	1/cm	
permeate pure water (membrane+fouling+cake)	0.97	m/s	$R_f =$	$4.7750E+09$	1/cm	$R_f = 3.5708E+08$ 1/cm
permeate pure water (membrane+fouling)	3.83	m/s	$R_f + R_m =$	$1.2041E+09$	1/cm	$R_f = 1.0074E+08$ 1/cm

ช่วงเวลา (min)	เวลาที่	ปริมาตร(ml)	เพอซิเอฟลักซ์ (cm ³ /cm ² /min)	ค่าจากเปกโตร	ความเข้มข้น เชนลิเทค(g/l)	ร้อยละ
0.5	0.25	110	2.1568			
1	0.75	72.5	1.4216			
1.5	1.25	53.5	1.0490			
2	1.75	40.5	0.7941			
3	2.5	67	0.6569			
4	3.5	46.5	0.4653			
5	4.5	45	0.4412			
6	5.5	38	0.3725			
8	7	65	0.3186			
10	9	50.5	0.2475			
12	11	41.5	0.2034			
14	13	36	0.1785			
16	15	29	0.1422			
18	17	25	0.1225			
20	19	22	0.1076			
25	22.5	45.5	0.0692			
30	27.5	40	0.0784			
35	32.5	36	0.0745			
40	37.5	36	0.0706			
45	42.5	35.5	0.0696			
50	47.5	34	0.0667			
55	52.5	34	0.0667			
60	57.5	34	0.0667			
65	62.5	34	0.0667			
70	67.5	33.5	0.0657			
75	72.5	34	0.0667			
80	77.5	33	0.0647			
85	82.5	33	0.0647			
90	87.5	32.5	0.0637			
95	92.5	32.5	0.0637			
100	97.5	33	0.0647			
105	102.5	33	0.0647			
110	107.5	33	0.0647			



วันที่ ๑๓/๐๔/๒๕

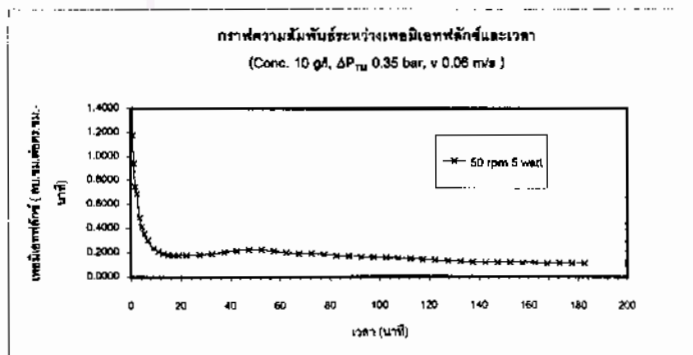
การทดลองที่ 145

ความดันที่ใช้ระบบ	0.35	บาร์	จำนวนรอบการไหล	1	ตัว
ความยาวท่อ	0.08	เมตร	ความเค็มในน้ำดื่ม	28	กรัม/ลิตร
ความเข้มข้น	10	กรัม/ลิตร	ค่าคงที่ของเมมเบรน	5	ตัว
ความยาวท่อ	80	เซนติเมตร			

ค่าความต้านทานการไหล

permeate pure water (membrane)	4.43	m/s	$R_m =$	$1.0412E+09$	1/cm	
permeate pure water (membrane+fouling-cake)	0.63	m/s	$R_f =$	$7.3853E+09$	1/cm	$R_m = 8.1376E+09$ 1/cm
permeate pure water (membrane+fouling)	3.70	m/s	$R_m + R_f =$	$1.2475E+09$	1/cm	$R_m + R_f = 2.0636E+09$ 1/cm

เวลาที่ไหล (min)	น้ำหนัก	ปริมาณ(ml)	เกลือที่เหลือทิ้ง (cm3/cm2*min)	ค่าความเค็ม	ความเข้มข้น เกลือ (g/l)	ร้อยละ
0.5	0.25	94	1.8431			
1	0.75	80	1.1785			
1.5	1.25	48	0.8412			
2	1.75	38	0.7451			
3	2.5	70	0.6653			
4	3.5	50	0.4902			
5	4.5	42	0.4118			
6	5.5	36	0.3529			
8	7	61.5	0.3015			
10	9	48	0.2353			
12	11	43	0.2108			
14	13	39	0.1912			
16	15	37	0.1814			
18	17	36	0.1785			
20	19	36	0.1785			
25	22.5	90	0.1785			
30	27.5	93	0.1824			
35	32.5	97	0.1802			
40	37.5	103	0.2020			
45	42.5	110	0.2157			
50	47.5	114	0.2235			
55	52.5	114	0.2235			
60	57.5	108	0.2116			
65	62.5	102	0.2000			
70	67.5	97	0.1902			
75	72.5	88	0.1922			
80	77.5	83	0.1824			
85	82.5	86	0.1725			
90	87.5	86	0.1698			
95	92.5	83	0.1627			
100	97.5	82	0.1608			
105	102.5	79	0.1549			
110	107.5	78	0.1529			
115	112.5	75	0.1471			
120	117.5	72	0.1412			
125	122.5	68	0.1333			
130	127.5	65	0.1275			
135	132.5	62	0.1216			
140	137.5	60	0.1176			
145	142.5	58	0.1157			
150	147.5	59	0.1157			
155	152.5	58	0.1137			
160	157.5	58	0.1137			
165	162.5	58	0.1137			
170	167.5	56	0.1098			
175	172.5	56	0.1098			
180	177.5	56	0.1098			
185	182.5	56	0.1098			



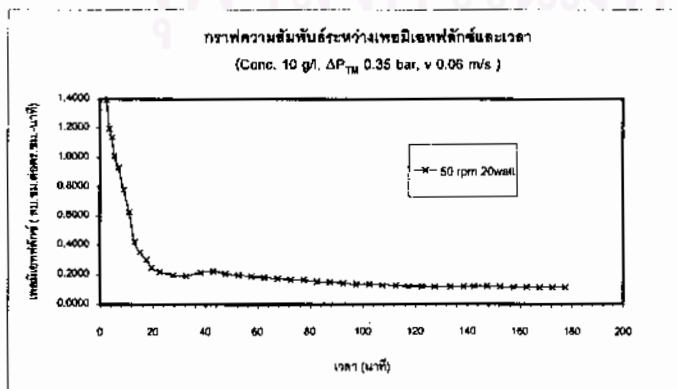
วันที่ 10/10/43
 การทดลองที่ 146

ความเข้มข้นเกลือ	0.35	กรัม	จำนวนหน่วยปริมาตร	1	ลิตร
ความดันออสโมติก	0.06	เมกะนิวตัน	ความดันคั่นเมมเบรน	28	บาร์
ความเข้มข้น	10	กรัมต่อลิตร	ความดันคั่นเมมเบรน	20	บาร์
ความดันออสโมติก	50	กรัมต่อลิตร			

ค่าความต้านทานการไหล

permeate pure water (membrane)	3.90	m/s	R_m	$1.1835E+09$	1/cm
permeate pure water (membrane + fouling - cake)	0.27	m/s	R_f	$1.7309E+10$	1/cm
permeate pure water (membrane + fouling)	1.67	m/s	$R_f - R_m$	$2.7695E+09$	1/cm

จำนวนเวลา (min)	น้ำหนัก	ปริมาตร (ml)	ความเข้มข้นเกลือ (mg/cm ³ หรือ ppm)	ค่าความดันออสโมติก	ความดันคั่น เมมเบรน (bar)	ร้อยละ
0.5	0.25	108	2.0784			
1	0.75	91	1.7843			
1.5	1.25	87	1.7059			
2	1.75	77	1.5098			
3	2.6	142	1.3622	0.04	0.034	99.664
4	3.5	122	1.1961			
5	4.5	118	1.1373			
8	5.5	108	1.0098			
8	7	190	0.6314			
10	9	159	0.7794	0.038	0.032	99.681
12	11	129	0.6275			
14	13	96	0.4218			
18	15	72	0.3528			
19	17.5	92	0.3007			
20	19.5	25	0.2451			
25	22.5	112	0.2198			
30	27.5	101	0.1980	0.037	0.026	99.740
35	32.5	96	0.1842			
41	38	132	0.2157			
45	43	91	0.2230			
50	47.5	105	0.2099	0.03	0.026	99.748
55	52.5	100	0.1961			
60	57.5	96	0.1862			
65	62.5	92	0.1804			
70	67.5	87.5	0.1716			
75	72.5	84.5	0.1657			
80	77.5	82.5	0.1618			
85	82.5	77.5	0.1520			
90	87.5	78.5	0.1500	0.027	0.023	99.773
95	92.5	71	0.1392			
100	97.5	86	0.1333			
105	102.5	68	0.1333			
110	107.5	65	0.1275			
115	112.5	63.5	0.1245			
120	117.5	60	0.1176			
125	122.5	60	0.1176			
130	127.5	59.5	0.1167	0.026	0.023	99.766
137	133.5	83.5	0.1189			
140	138.5	38.5	0.1103			
145	142.5	62	0.1216			
150	147.5	62	0.1216			
155	152.5	59	0.1157			
160	157.5	56	0.1137			
165	162.5	58	0.1137			
170	167.5	56.5	0.1108	0.019	0.016	99.841
175	172.5	56.5	0.1108			
180	177.5	56.5	0.1108			



วันที่ 11/10/43
การทดลองที่ 147

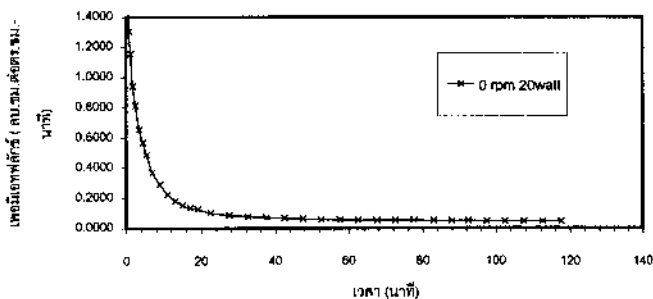
ความดันคร่อมเยื่อเมม	0.35	บาร์	จำนวนรอบเคียวเซอร์	1	ตัว
ความไวความดัน	0.06	เมกะพาสคาล	ความดันในหน่วยเดิม	28	กิโลนิวตัน
ความเข้มข้น	10	กรัมต่อลิตร	กำลังดันหน่วยเดิม	20	วัตต์
ความเร็วรอบหมุน	0	รอบต่อนาที			

ค่าความต้านทานการกรอง

permeate pure water (membrane)	4.23	m/s	$R_m =$	$1.0903E+08$	1/cm		
permeate pure water (membrane+fouling+cake)	0.08	m/s	$R_f =$	$8.1544E+10$	1/cm	$R_c =$	$8.0340E+10$ 1/cm
permeate pure water (membrane+fouling)	3.83	m/s	$R_m + R_f =$	$1.2041E+09$	1/cm	$R_c =$	$1.1378E+08$ 1/cm

ช่วงเวลา (min)	น้ำหนัก	ปริมาตร(ml)	เพอมีเอทฟลักซ์ (cm ³ /cm ² /min)	ค่าจากกราฟโคโร	ความเข้มข้น เพอมีเอท (g/l)	%ที่เจือปน
0.5	0.25	97	1.9020			
1	0.75	66.5	1.3038			
1.5	1.25	59	1.1589			
2	1.75	48	0.9412			
3	2.5	83	0.8137			
4	3.5	67	0.8589			
5	4.5	56	0.5686			
6	5.5	50	0.4902			
8	7	76	0.3725			
10	9	60	0.2941			
12	11	48	0.2255			
14	13	37	0.1814			
16	15	31.5	0.1544			
18	17	28	0.1373			
20	19	26	0.1275			
25	22.5	52.5	0.1028			
30	27.5	44.5	0.0873			
35	32.5	40	0.0784			
40	37.5	37	0.0725			
45	42.5	34	0.0667			
50	47.5	31.5	0.0618			
55	52.5	29	0.0569			
60	57.5	28	0.0549			
65	62.5	27	0.0528			
70	67.5	28.5	0.0520			
75	72.5	28	0.0510			
80	77.5	26	0.0510			
86	83	30.5	0.0496			
90	88	20	0.0490			
95	92.5	25	0.0490			
100	97.5	24	0.0471			
105	102.5	23	0.0451			
110	107.5	23	0.0451			
115	112.5	23	0.0451			
120	117.5	23	0.0451			

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเพอมีเอทฟลักซ์และเวลา
(Conc. 10 g/l, ΔP_{TM} 0.35 bar, v 0.06 m/s)



วันที่ 11/10/43
การทดลองที่ 148

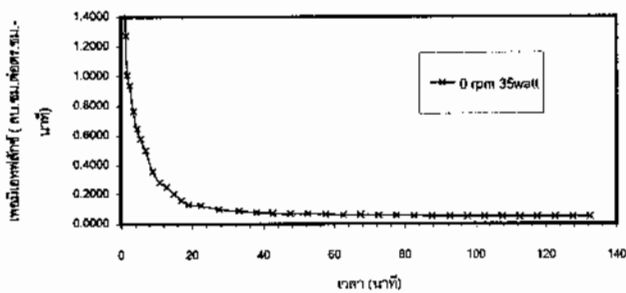
ความดันคร่อมเยื่อเมมเบรน	0.35 บาร์	จำนวนรอบการสตีวอร์	1	ค่า
ความเร็วหมุนเวียน	0.08 เมตรต่อวินาที	ความถี่ที่พิมพ์บนใบมือถือ	28	กิโลเฮิรตซ์
ความเข้มข้น	10 กรัมต่อลิตร	ค่าสัมประสิทธิ์เมย์เยิน	35	วัตต์
ความเร็วของหมุน	0 รอบต่อนาที			

คำนวณด้วยสมการกรอง

permeate pure water (membrane)	4.03	ml/s	$R_m =$	$1.1444E+09$	1/cm	
permeate pure water (membrane+fouling+cake)	0.06	ml/s	$R_f =$	$5.6300E+10$	1/cm	$R = 5.3834E+10$ 1/cm
permeate pure water (membrane+fouling)	2.97	ml/s	$R_f + R_m =$	$1.5559E+09$	1/cm	$R_f = 4.1147E+08$ 1/cm

ช่วงเวลา (min)	นาฬิกา	ปริมาตร(ml)	เพอเมอแฟล็กซ์ (cm ³ /cm ² /min)	ค่าจากสมป/ก/ไร	ความเข้มข้น เพลอ (g/l)	%เจือจาง
0.5	0.25	101	1.8604			
1	0.75	82	1.6076			
1.5	1.25	65	1.2745			
2	1.75	61.5	1.0098			
3	2.5	96	0.8412			
4	3.5	78	0.7847			
5	4.5	66	0.6471			
6	5.5	59	0.5784			
8	7	102	0.5000			
10	9	73	0.3578			
12	11	58	0.2843			
14	13	51	0.2500			
16	15	42	0.2059			
18	17	33	0.1618			
20	19	27	0.1324			
25	22.5	65	0.1275			
30	27.5	51	0.1000			
36	33	55	0.0899			
40	38	32	0.0784			
45	42.5	38	0.0745			
50	47.5	35	0.0686			
55	52.5	35.5	0.0696			
60	57.5	33.5	0.0657			
65	62.5	31.5	0.0618			
70	67.5	31	0.0606			
75	72.5	30	0.0588			
80	77.5	29	0.0569			
85	82.5	28	0.0549			
90	87.5	27	0.0529			
95	92.5	26	0.0510			
100	97.5	26	0.0510			
105	102.5	26	0.0510			
110	107.5	25	0.0490			
115	112.5	25	0.0490			
120	117.5	24.5	0.0480			
125	122.5	24.5	0.0480			
130	127.5	24.5	0.0480			
135	132.5	24.5	0.0480			

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเพอเมอแฟล็กซ์และเวลา
(Conc. 10 g/l, ΔP_{TM} 0.35 bar, v 0.06 m/s)



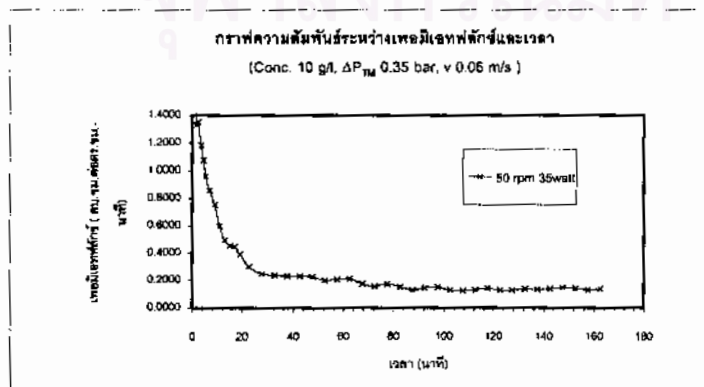
วันที่ 12/10/43
 ภาควิชาเคมี 149

ความเข้มข้นของเยื่อ	0.35	บาร์	จำนวนรอบการหมุน	1	วินาที
ความเร็วของปั๊ม	0.06	เมตรต่อวินาที	ความดันในระบบ	28	กิโลเมตร
ความเข้มข้น	10	กรัมต่อลิตร	หัวฉีดในหน่วยอื่น	36	วินาที
ความเร็วของปั๊ม	30	รอบต่อวินาที			

ค่าความต้านทานการไหล

permeate pure water (membrane)	3.58	m/s	$R_m =$	$1.2861E+09$	1/cm	
permeate pure water (membrane+fouling+cake)	0.35	m/s	$R_f =$	$1.3188E+10$	1/cm	$R_f = 1.0210E+10$ 1/cm
permeate pure water (membrane+fouling)	1.55	m/s	$R_m + R_f =$	$2.9770E+09$	1/cm	$R_{m+f} = 1.0090E+09$ 1/cm

ช่วงเวลา (นาที)	น้ำหนัก	ปริมาตร (cm ³)	ผลผลิตเยื่อที่แห้ง (cm ³ /cm ² /นาที)	ค่าจากสมการไฮโดร	ความเข้มข้นของเยื่อ (g/g)	น้ำหนักเยื่อ
0.5	0.25	93	1.8235			
1	0.75	86	1.6867			
1.5	1.25	80	1.5688			
2	1.75	68	1.3333			
3	2.5	136	1.3529			
4	3.5	121	1.1863			
5	4.5	110	1.0784			
8	5.5	98	0.9808			
8	7	175	0.6578			
10	9	154	0.7549			
12	11	122	0.5980			
14	13	101	0.4951			
18	15	93	0.4558			
18	17	92	0.4510			
20	19	80	0.3822			
25	22.5	154	0.3020			
30	27.5	126	0.2471			
35	32.5	121	0.2373			
40	37.5	118	0.2214			
45	42.5	118	0.2314			
50	47.5	116	0.2275			
55	52.5	102	0.2000			
60	57.5	105	0.2059			
65	62.5	106	0.2118			
70	67.5	87.5	0.1716			
75	72.5	80	0.1568			
80	77.5	87.5	0.1716			
85	82.5	77	0.1510			
90	87.5	87	0.1314			
95	92.5	74	0.1451			
100	97.5	77	0.1510			
105	102.5	66	0.1294			
110	107.5	63	0.1235			
115	112.5	67	0.1314			
120	117.5	72	0.1412			
125	122.5	66	0.1284			
130	127.5	66	0.1284			
135	132.5	70	0.1373			
140	137.5	67.5	0.1324			
145	142.5	70	0.1373			
150	147.5	75	0.1471			
155	152.5	72	0.1412			
160	157.5	65.5	0.1284			
165	162.5	70	0.1373			



วันที่ 13/10/43
การทดลองที่ 150

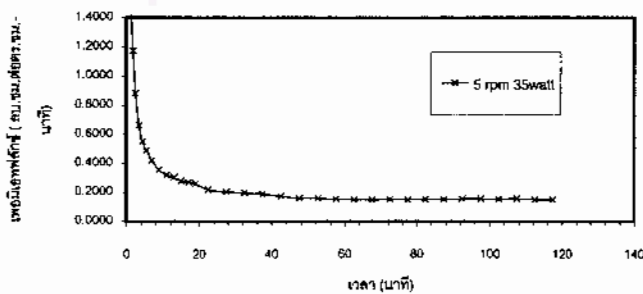
ความดันคร่อมเมมเบรน	0.35	บาร์	จำนวนรอบการสับ	1	ตัว
ความเร็วสายป้อน	0.08	เมตรต่อนาที	ความเค็มในหน่วยดีเอส	28	กิโลกรัมตอจ
ความเข้มข้น	10	กรัมฟอสฟอริก	กำลังหมุนรอบต่อนาที	35	วัตต์
ความกว้างของหลอด	5	ซมต่อนาที			

ค่าความต้านทานการกรอง

permeate pure water (membrane)	4.43	m/s	$R_m =$	$1.0412E+09$	1/cm
permeate pure water (membrane+fouling+cake)	0.42	m/s	$R =$	$1.1078E+10$	1/cm
permeate pure water (membrane+fouling)	3.50	m/s	$R_f + R_m =$	$1.3188E+09$	1/cm

ช่วงเวลา (min)	นาฬิกา	ปริมาตร(ml)	เฟรมิเลทฟอสฟอริก (cm ³ /m ² /min)	ค่าจากกราฟโคโร	ความเข้มข้น เฟรมิเลท (g/l)	%รีเจคชั่น
0.5	0.25	105	2.0588			
1	0.75	83	1.6275			
1.5	1.25	74	1.4510			
2	1.75	60	1.1765			
3	2.5	80	0.8824			
4	3.5	88	0.6667			
5	4.5	58.5	0.5539			
6	5.5	50	0.4902			
8	7	86	0.4216			
10	9	72.5	0.3554			
12	11	65.5	0.3211			
14	13	62.5	0.3064			
16	15	57	0.2794			
18	17	55	0.2696			
20	19	53.5	0.2623			
25	22.5	112	0.2196			
30	27.5	104	0.2039			
35	32.5	101	0.1860			
40	37.5	97.5	0.1912			
45	42.5	90	0.1765			
50	47.5	82	0.1608			
55	52.5	81.5	0.1598			
60	57.5	80	0.1569			
65	62.5	77.5	0.1520			
70	67.5	77.5	0.1520			
75	72.5	79	0.1549			
80	77.5	77.5	0.1520			
85	82.5	78	0.1529			
90	87.5	79	0.1549			
95	92.5	81	0.1568			
100	97.5	81	0.1568			
105	102.5	80	0.1569			
110	107.5	81	0.1568			
115	112.5	77	0.1510			
120	117.5	77.5	0.1520			

กราฟความเข้มข้นที่ระหว่างเฟรมิเลทฟอสฟอริกและเวลา
(Conc. 10 g/l, ΔP_{TM} 0.35 bar, v 0.08 m/s)



วันที่ 14/10/43

การทดลองที่ 161

ความดันเครื่องเชื่อมฉนวน	0.35 บาร์	จำนวนทรานสดิวเซอร์	1 ตัว
ความเร็วสายพาน	0.08 เมตร/วินาที	ความดันเครื่องเชื่อม	28 กิโลกรัม
ความเข้มข้น	10 กรัม/ลิตร	กำลังขับมอเตอร์	35 วัตต์
ความเร็วรอบหมุน	20 รอบต่อนาที		

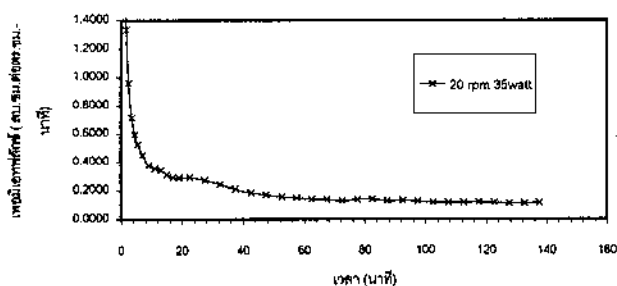
ค่าความต้านทานการไหลของ

permeate pure water (membrane)	3.73	m/s	$R_m =$	$1.2364E+08$	1/cm	
permeate pure water (membrane+fouling+cake)	0.20	m/s	$R_f =$	$2.3470E+10$	1/cm	$R_f = 2.1372E+10$ 1/cm
permeate pure water (membrane+fouling)	2.20	m/s	$R_f + R_m =$	$2.0951E+09$	1/cm	$R_f = 8.6172E+08$ 1/cm

ช่วงเวลา (นาที)	เวลาที่	ปริมาณคอก (ml)	เพอมีเตทผลิต (cm ³ cm ² min)	ค่าจากสเปกโทร	ความเข้มข้น เพอมีเตท (g/l)	%รีเจคชัน
0.5	0.25	100	1.9608			
1	0.75	86	1.6967			
1.5	1.25	81	1.5882			
2	1.75	86	1.3333			
3	2.5	86	0.9608			
4	3.5	73	0.7157			
5	4.5	81	0.5960			
6	5.5	54	0.6294			
8	7	82	0.4510			
10	9	77.6	0.3799			
12	11	73	0.3578			
14	13	70	0.3431			
16	15	64	0.3137			
18	17	60	0.2941			
20	19	60	0.2941			
25	22.5	150	0.2941			
30	27.5	141	0.2786			
35	32.5	126	0.2471			
40	37.5	108	0.2118			
45	42.5	94	0.1843			
50	47.5	87	0.1708			
55	52.5	79	0.1549			
60	57.5	75	0.1471			
65	62.5	70	0.1373			
70	67.5	69	0.1353			
75	72.5	66	0.1294			
80	77.5	69	0.1353			
85	82.5	71	0.1392			
90	87.5	64	0.1266			
95	92.5	68.5	0.1304			
100	97.5	63	0.1235			
105	102.5	60	0.1176			
110	107.5	59	0.1167			
115	112.5	59	0.1167			
120	117.5	80	0.1176			
125	122.5	59	0.1157			
130	127.5	57	0.1118			
135	132.5	57	0.1118			
140	137.5	59	0.1167			

กราฟความเข้มข้นระหว่างเพอมีเตทผลิตกับเวลา

(Conc. 10 g/l, ΔP_{TM} 0.35 bar, v 0.06 m/s)



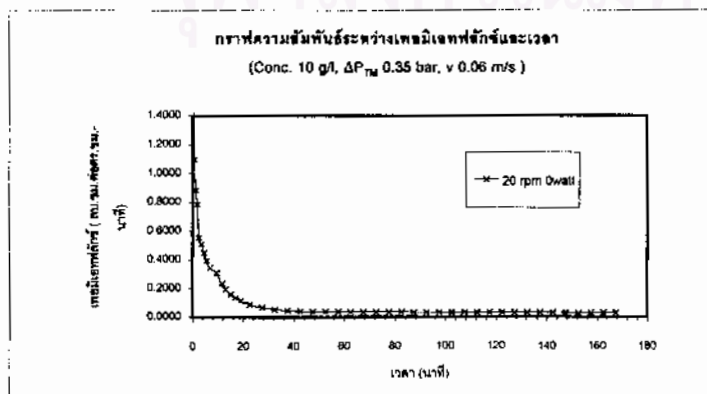
วันที่ 17/10/43
 การทดลองที่ 152

ความเข้มข้นของสารละลาย	0.35	กรัม	จำนวนรอบการหมุน	0	วินาที
ความดันของสารละลาย	0.08	บาร์	ความเร็วในการหมุน	0	รอบต่อนาที
ความเข้มข้นของสารละลาย	10	กรัมต่อลิตร	เวลาที่ทำการทดลอง	0	วินาที
ความดันของสารละลาย	20	รอบต่อนาที			

ค่าความต้านทานการไหล

permeate pure water (membrane)	4.78	ml/s	R_m	$9.649E+06$	1/cm		
permeate pure water (membrane-fouling cake)	0.05	ml/s	R_f	$9.8910E+10$	1/cm	R_m	$9.7981E+10$
permeate pure water (membrane-fouling)	4.40	ml/s	R_m+R_f	$1.0490E+08$	1/cm	R_m	$8.4070E+07$

ช่วงเวลา (นาที)	เวลาที่	ปริมาณของน้ำ (ml)	ความเข้มข้นของสารละลาย (mg/ml)	ค่าความต้านทานการไหล	ความเข้มข้นของสารละลาย	ค่าความต้านทานการไหล
0.5	0.25	81	1.7843			
1	0.75	56	1.0060			
1.6	1.25	45	0.8824			
2	1.75	40	0.7943			
3	2.5	56.5	0.6538			
4	3.5	52	0.5098			
5	4.5	46	0.4510			
6	5.5	40	0.3922			
8	7	70	0.3431			
11	9.5	94	0.3072			
12	11.5	24	0.2953			
14	13	40	0.1961			
18	16	33	0.1618			
18	17	26	0.1373			
20	19	24	0.1179			
25	22.5	45	0.0862			
30	27.5	34	0.0687			
35	32.5	27.5	0.0539			
40	37.5	24	0.0471			
45	42.5	20.75	0.0407			
50	47.5	20	0.0392			
55	52.5	16	0.0373			
60	57.5	18.25	0.0358			
65	62.5	18	0.0353			
70	67.5	17.5	0.0343			
75	72.5	17.5	0.0343			
80	77.5	17	0.0333			
85	82.5	17	0.0333			
90	87.5	16.5	0.0324			
95	92.5	16.5	0.0324			
100	97.5	16	0.0314			
105	102.5	15	0.0314			
110	107.5	15	0.0314			
115	112.5	15.5	0.0304			
120	117.5	15.5	0.0304			
125	122.5	15.5	0.0304			
130	127.5	15	0.0294			
135	132.5	14.75	0.0289			
140	137.5	14.5	0.0284			
145	142.5	14.5	0.0284			
150	147.5	14.5	0.0279			
155	152.5	14	0.0275			
160	157.5	14	0.0275			
165	162.5	14	0.0275			
170	167.5	14	0.0275			



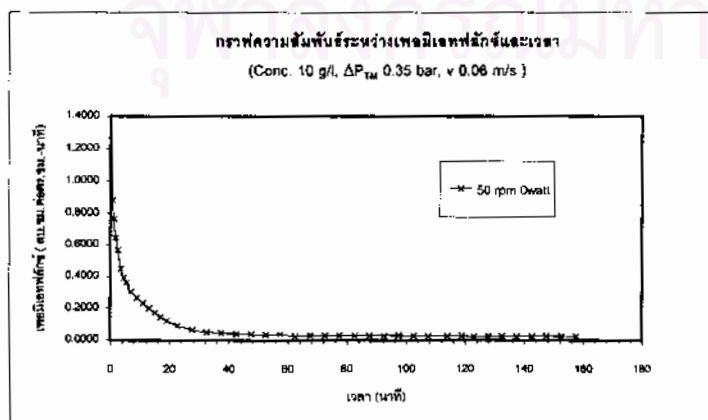
วันที่ 4/1/44
 หมายเลข 157

ความดัน/อุณหภูมิ	0.35 บาร์	จำนวนรอบการหมุน	0	วินาที
ความเร็วการไหล	0.06 เมตรต่อวินาที	ความดันเริ่มต้น/สิ้นสุด	0	บาร์/บาร์
ความเข้มข้น	10 กรัมต่อลิตร	เวลาที่สิ้นสุดการทดลอง	0	วินาที
ความยาวของท่อ	60 เซนติเมตร			

ค่าความต้านทานการไหล

permeate pure water (membrane)	2.77	m/s	Rm =	1.2254E+09 1/cm	
permeate pure water (membrane+fouling+cake)	0.05	m/s	Rf =	1.0257E+11 1/cm	Rf = 1.0112E+11 1/cm
permeate pure water (membrane + fouling)	3.17	m/s	Rp+Rm =	1.4575E+09 1/cm	Rp = 2.3219E+08 1/cm

ช่วงเวลา (วินาที)	เวลาที่	ปริมาณที่ไหล (ml)	พอลิเมอร์ที่ตกค้าง (cm ³ /cm ² นาที)	ค่าจากสมการ	ความเข้มข้นของพอลิเมอร์ (g/l)	พอลิเมอร์
0.5	0.25	75	1.4708			
1	0.75	45	0.8824			
1.5	1.25	39	0.7647			
2	1.75	33	0.5471			
3	2.5	58	0.5888			
4	3.5	46	0.4510			
5	4.5	40	0.3822			
6	5.5	37	0.3627			
8	7	62.5	0.3064			
10	9	54	0.2647			
12	11	48	0.2353			
14	13	41	0.2010			
16	15	35	0.1716			
18	17	30	0.1471			
20	19	25	0.1225			
25	22.5	46.5	0.0912			
30	27.5	33	0.0647			
35	32.5	28	0.0510			
40	37.5	22	0.0431			
45	42.5	20	0.0362			
50	47.5	18.5	0.0303			
55	52.5	17.5	0.0243			
60	57.5	16.5	0.0282			
65	62.5	12.5	0.0245			
70	67.5	15.5	0.0304			
75	72.5	15	0.0284			
80	77.5	15	0.0294			
85	82.5	14.5	0.0264			
90	87.5	14	0.0275			
95	92.5	14	0.0275			
100	97.5	14	0.0275			
105	102.5	13.5	0.0265			
110	107.5	13	0.0255			
118	114	20.5	0.0251			
120	119	5.5	0.0270			
126	123	15	0.0245			
130	128	10	0.0245			
136	132.5	12.25	0.0240			
140	137.5	12	0.0235			
145	142.5	12	0.0235			
150	147.5	13.5	0.0265			
155	152.5	12	0.0235			
160	157.5	12.25	0.0240			



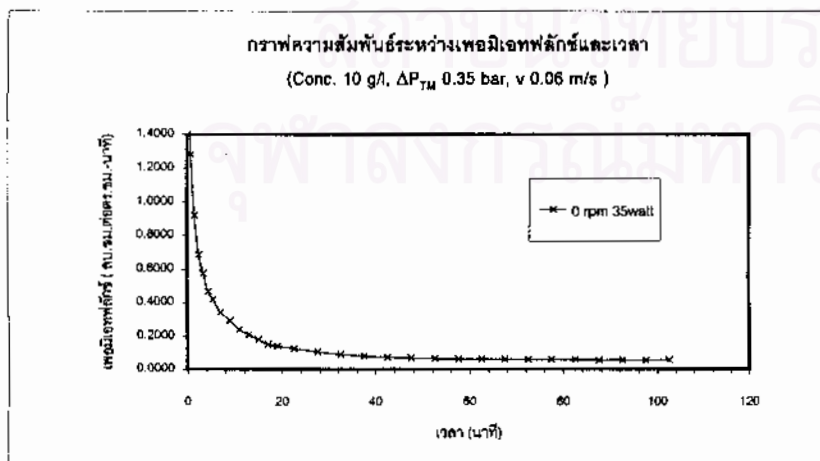
วันที่ 7/1/44
ภาคต่อหน้า 161

ความหนาของเมมเบรน	0.35	ไมล์	จำนวนพอร์ส	1	ตัว
ความเร็วสายป้อน	0.06	เมตรต่อวินาที	ความถี่สั่นเหนือเสียง	28	กิโลเฮิรตซ์
ความเข้มข้น	10	กิโลกรัมต่อลิตร	กำลังสั่นเหนือเสียง	35	วัตต์
ความเร็วรอบหมุน	0	รอบต่อนาที			

ค่าความต้านทานการกรอง

permeate pure water (membrane)	3.20	m/s	$R_m =$	1.4424E+09	1/cm	
permeate pure water (membrane+fouling+cake)	0.15	m/s	$R_f =$	3.1651E+10	1/cm	$R_f = 2.9962E+10$ 1/cm
permeate pure water (membrane+fouling)	2.73	m/s	$R_p + R_m =$	1.6887E+09	1/cm	$R_p = 2.4627E+08$ 1/cm

ช่วงเวลา (min)	เวลาที่	ปริมาตร(ml)	เพอเมตฟลักซ์ (cm ³ /cm ² /min)	ค่าจากสเปกโตร	ความเข้มข้น เอมัลชัน (g/l)	%ของแข็ง
0.5	0.25	90	1.7647			
1	0.75	65.5	1.2843			
2	1.5	94	0.9218			
3	2.5	70	0.6853			
4	3.5	59	0.5784			
5	4.5	47.5	0.4657			
6	5.5	43	0.4218			
8	7	70	0.3431			
10	9	80	0.2941			
12	11	49	0.2402			
14	13	43	0.2108			
16	15	37	0.1814			
18	17	31	0.1520			
20	19	29	0.1422			
25	22.5	64	0.1255			
30	27.5	54	0.1059			
35	32.5	46	0.0902			
40	37.5	41	0.0804			
45	42.5	37	0.0725			
50	47.5	35	0.0686			
55	52.5	33.5	0.0657			
60	57.5	32	0.0627			
65	62.5	31	0.0608			
70	67.5	31	0.0608			
75	72.5	30.5	0.0598			
80	77.5	30	0.0588			
85	82.5	30	0.0588			
90	87.5	28	0.0548			
95	92.5	28	0.0548			
100	97.5	28	0.0548			
105	102.5	28	0.0560			



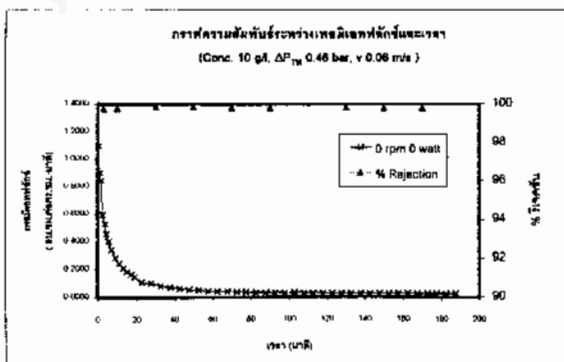
วันที่ 19/4/43
 หมายเลข 116

ความดันหน้าเมมเบรน	0.46 บาร์	จำนวนหน่วยเมมเบรน	0 ชุด
ความเข้มข้นเกลือ	0.06 แกดเปอร์เซ็นต์	ความดันหน้าเมมเบรน	0 กิโลกรัม
ความเข้มข้น	10 แกดเปอร์เซ็นต์	ความดันหน้าเมมเบรน	0 ชุด
ความเข้มข้น	0 แกดเปอร์เซ็นต์		

ค่าการนำผ่านเมมเบรน:

permeate pure water (membrane)	4.57 ml/s	$R_m =$	$1.2465E-09$ 1/cm	
permeate pure water (membrane+housing+case)	0.04 ml/s	$R_s =$	$1.4580E-11$ 1/cm	$R_m +$
permeate pure water (membrane+housing)	4.63 ml/s	$R_m + R_s =$	$1.3093E-09$ 1/cm	$8.2775E-07$ 1/cm

จำนวนรอบ (min)	เวลาที่ (min)	ปริมาณน้ำ (ลิตร)	เกลือในน้ำที่ผลิต (mg/L หรือ g/m ³)	ค่าจากแก๊สโคร	ค่าการนำผ่าน (ml/m ² /h)	ร้อยละ (%)
0.5	0.25	100	1.0908			
1	0.75	96	1.0980			
1.5	1.25	46	0.9020			
2	1.75	43	0.8431			
3	2.5	81	0.5960	0.026	0.023	99.765
4	3.5	64	0.5294			
5	4.5	48.5	0.4559			
8	6.5	41	0.4020			
8	7	70	0.3431			
10	9	58.5	0.2889	0.028	0.022	99.782
12	11	60	0.2451			
14	13	43	0.2106			
18	15	38	0.1853			
18	17	34	0.1667			
20	19	30.5	0.1495			
26	22.5	66	0.1078			
30	27.5	52.5	0.1028	0.016	0.013	99.866
35	32.5	43	0.0840			
40	37.5	37	0.0725			
45	42.5	32	0.0627			
50	47.5	28.5	0.0556	0.018	0.015	99.849
55	52.5	26	0.0510			
60	57.5	23	0.0451			
65	62.5	21	0.0412			
70	67.5	19.5	0.0382	0.019	0.016	99.841
75	72.5	18.5	0.0363			
80	77.5	18	0.0353			
85	82.5	17	0.0333			
90	87.5	16.5	0.0324	0.019	0.018	99.841
95	92.5	16	0.0314			
100	97.5	15.75	0.0309			
105	102.5	15.5	0.0304			
110	107.5	15.5	0.0304			
115	112.5	15	0.0294			
120	117.5	14.5	0.0284			
125	122.5	14	0.0275			
130	127.5	13.75	0.0270	0.02	0.017	99.832
135	132.5	13.5	0.0265			
140	137.5	13.25	0.0260			
145	142.5	13	0.0255			
150	147.5	13	0.0255	0.021	0.018	99.824
155	152.5	13	0.0255			
160	157.5	12.75	0.0250			
165	162.5	12.5	0.0245			
170	167.5	12.25	0.0240	0.022	0.018	99.815
175	172.5	12	0.0235			
180	177.5	12	0.0235			
185	182.5	12.25	0.0240			
190	187.5	12	0.0235			



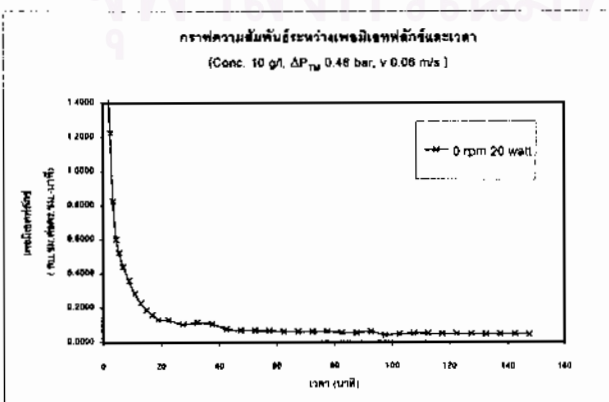
วันที่ 14/0/43
การทดลองที่ 119

ความเค็มของน้ำดิบ	0.46	บาร์	จำนวนเยื่อหุ้มตัวกรอง	1	ตัว
ความเค็มของน้ำกลั่น	0.06	เมกซ์คัลบาร์	ความเค็มของน้ำกลั่น	28	ลิตร
ความเข้มข้น	10	กรัมต่อลิตร	กำลังวัตต์ของมอเตอร์	20	วัตต์
ความถี่รอบหมุน	0	รอบต่อวินาที			

ค่าความต้านทานการกรอง

permeate pure water (membrane)	4.70	m/s	$R_m =$	$1.2907E+09$	1/cm
permeate pure water (membrane+fouling+calc)	0.09	m/s	$R_f =$	$6.8999E+10$	1/cm
permeate pure water (membrane+fouling)	4.33	m/s	$R_f + R_m =$	$1.4000E+09$	1/cm

ช่วงเวลา (min)	นาฬิกา	ปริมาตร(ml)	เฟลลิวิตี (cm ³ /cm ² /min)	ค่าจากคอมพิวเตอร์	ความเข้มข้นเฟลลิวิตี (g/l)	ทั้งหมด
0.5	0.25	115	2.3137			
1	0.75	92	1.8039			
1.5	1.25	82	1.6078			
2	1.75	74	1.4810			
3	2.5	125	1.2255			
4	3.5	84	0.8235			
5	4.5	61.5	0.6029			
6	5.5	53.5	0.5245			
8	7	60	0.4412			
10	9	73.5	0.3803			
12	11	68	0.2843			
14	13	47	0.2304			
16	16	39	0.1912			
18	17	33	0.1618			
20	19	27	0.1324			
25	22.5	66.5	0.1304			
30	27.5	53	0.1039			
35	32.5	59	0.1157			
40	37.5	55	0.1078			
45	42.5	40	0.0784			
50	47.5	35	0.0686			
55	52.5	35	0.0686			
60	57.5	34	0.0687			
65	62.5	32	0.0627			
70	67.5	31	0.0608			
75	72.5	29.5	0.0578			
80	77.5	32	0.0627			
85	82.5	28	0.0549			
90	87.5	27	0.0529			
95	92.5	31	0.0608			
100	97.5	20.5	0.0402			
105	102.5	24.5	0.0480			
110	107.5	25.5	0.0500			
115	112.5	25	0.0490			
120	117.5	24	0.0471			
125	122.5	25.5	0.0500			
130	127.5	25	0.0490			
135	132.5	24.5	0.0480			
140	137.5	25	0.0490			
145	142.5	26.5	0.0600			
150	147.5	24	0.0471			



วันที่	15/04/3		
ภาคการสอบ	120		
ความดันที่ป้อน	0.46 บาร์	จำนวนพอร์ต	1 ตัว
ความเร็วรอบ	0.06 เมตร/วินาที	ความถี่	28 ครั้ง/วินาที
ความเข้มข้น	10 กรัม/ลิตร	จำนวนหน่วย	36 หน่วย
ความเร็วหมุน	0 หน่วย/วินาที		

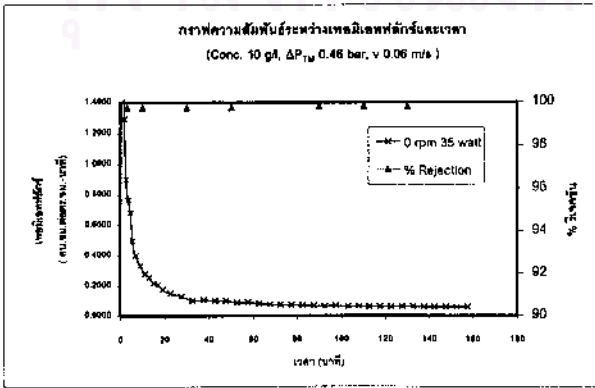
ค่ารวมที่พหุคูณการทดสอบ

permeate pure water (membrane) 4.53 m/s $R_m = 1.3382E+08$ 1/m

permeate pure water (membrane+fouling+calu) 0.11 m/s $R_f = 5.6873E+10$ 1/m $R_f = 5.5391E+10$ 1/m

permeate pure water (membrane+fouling) 3.93 m/s $R_f+R_m = 1.5429E+09$ 1/m $R_f = 2.0419E+08$ 1/m

ช่วงเวลา (min)	เวลาที่	ปริมาตร(m)	ผลผลิตสุทธิ (cm ³ /cm ² /min)	ค่าจากพหุคูณ	ความเข้มข้น (mg/l)	ร้อยละ
0.5	0.25	113	2.2157			
1	0.75	94	1.8431			
1.5	1.25	86	1.6863			
2	1.75	68	1.2941			
3	2.5	92	0.9020	0.027	0.023	99.773
4	3.5	78	0.7647			
5	4.5	89.5	0.6814			
8	5.5	50.5	0.4951			
8	7	81.5	0.3995			
10	9	68	0.3333	0.028	0.024	99.757
12	11	57	0.2794			
14	13	52	0.2549			
16	15	44	0.2157			
18	17	42.5	0.2063			
20	19	36	0.1765			
25	22.5	78	0.1490			
30	27.5	56	0.1294	0.028	0.022	99.782
35	32.5	53	0.1039			
40	37.5	54	0.1059			
45	42.5	50	0.0990			
50	47.5	50	0.0990	0.026	0.022	99.782
55	52.5	44	0.0863			
60	57.5	48	0.0902			
65	62.5	42	0.0824			
70	67.5	39	0.0765			
75	72.5	37.5	0.0735			
80	77.5	36	0.0706			
85	82.5	35	0.0686			
90	87.5	34	0.0667	0.02	0.017	99.832
95	92.5	33	0.0647			
100	97.5	34	0.0667			
105	103	38	0.0621			
110	108	28	0.0637	0.02	0.017	99.832
115	112.5	31.5	0.0618			
120	117.5	31	0.0608			
125	122.5	30.5	0.0588			
130	127.5	31	0.0598	0.021	0.018	99.824
135	132.5	31	0.0608			
140	137.5	30.5	0.0588			
145	142.5	29	0.0569			
150	147.5	29	0.0569			
155	152.5	29	0.0569			
160	157.5	29	0.0569			



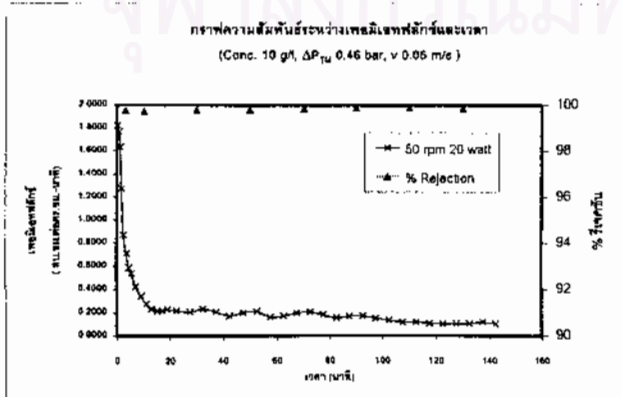
วันที่ 16/04/3
 การทดลองที่ 122

ความเข้มข้นของเกลือ	0.46	กรัม	จำนวนหน่วยเครื่องจักร	1	ตัว
ความเร็วสายพาน	0.06	เมตรต่อวินาที	ความดันคั่นเกลือของ	20	กิโลเมตร
ความเข้มข้น	10	กรัมต่อลิตร	กำลังขับของมอเตอร์	20	วัตต์
ความเร็วรอบหมุน	50	รอบต่อวินาที			

ค่าความต้านทานการกรอง

permeate pure water (membrane)	3.73	m/s	$R_m =$	$1.6250E+09$	1/cm	
permeate pure water (membrane+fouling+cat)	1.90	m/s	$R_f =$	$3.1929E+09$	1/cm	$R_c = 1.3729E+08$ 1/cm
permeate pure water (membrane+fouling)	3.33	m/s	$R_m + R_c =$	$1.8199E+09$	1/cm	$R_f = 1.9499E+08$ 1/cm

ช่วงเวลา (min)	นาฬิกา	ปริมาณ(ml)	ผลผลิตฟลักซ์ (cm ³ /cm ² /min)	ค่าจากสมการโบล	ความเข้มข้น (เกลือ)(g/l)	ร้อยละ
0.5	0.25	93	1.8236			
1	0.75	90	1.7647			
1.5	1.25	89.6	1.6373			
2	1.75	88	1.2745			
3	2.5	89	0.8725	0.028	0.023	99.765
4	3.5	72.5	0.7108			
5	4.5	80	0.6882			
8	5.5	55	0.5392			
8	7	86	0.4216			
10	8	70	0.3431	0.031	0.028	99.740
12	11	55.5	0.2721			
14	13	47	0.2304			
16	15	44	0.2167			
18	17	45	0.2206			
20	18	47	0.2304			
25	22.5	110	0.2157			
30	27.5	108	0.2078	0.026	0.022	99.782
35	32.5	120	0.2353			
40	37.5	108	0.2118			
45	42.5	88	0.1725			
50	47.5	104	0.2039	0.025	0.021	99.790
55	52.5	109	0.2137			
60	57.5	84	0.1847			
65	62.5	86	0.1725			
70	67.5	102	0.2000	0.019	0.016	99.841
75	72.5	106	0.2078			
80	77.5	94	0.1843			
85	82.5	80	0.1569			
90	87.5	87	0.1708	0.014	0.012	99.883
95	92.5	69	0.1745			
100	97.5	78	0.1529			
105	102.5	70	0.1373			
110	107.5	61.5	0.1206	0.014	0.012	99.883
115	112.5	61	0.1196			
120	117.5	55	0.1078			
125	122.5	54.5	0.1069			
130	127.5	54.6	0.1069	0.016	0.013	99.866
135	132.5	55	0.1078			
140	137.5	62	0.1216			
145	142.5	54.5	0.1069			



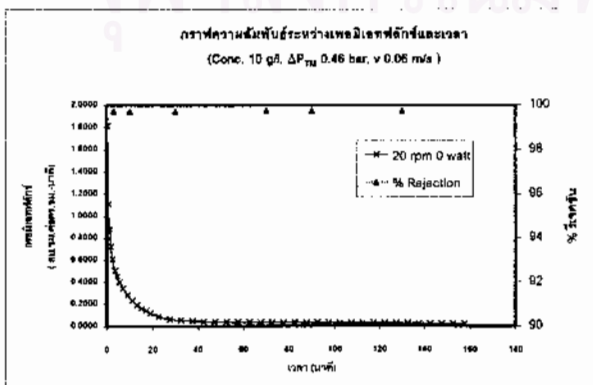
วันที่ 18/04/23
ภาพแสดงที่ 123

ความดันคร่อมเมมเบรน	0.46	บาร์	จำนวนรอบเครื่องรีไซเคิล	0	ตัว
ความเร็วรอบเครื่อง	0.06	เมตรต่อวินาที	ความเข้มข้นของเกลือ	0	กรัม/ลิตร
ความเข้มข้น	10	กรัมต่อลิตร	ค่าคงที่ของเครื่องรีไซเคิล	0	ตัว
ความเร็วรอบเครื่อง	20	รอบต่อวินาที			

ค่ารวมตัวกันรวมการกรอง

permeate pure water (membrane)	4.63	m/s	$R_m =$	1.3382E+09	1/m	
permeate pure water (membrane+fouling+calz)	0.06	m/s	$R_f =$	1.3481E+11	1/m	
permeate pure water (membrane+fouling)	4.60	m/s	$R_m + R_f =$	1.3180E+09	1/m	
				$R_p =$	1.3349E+11	
					$R_{p2} =$	1.8304E+07

ช่วงเวลา (min)	เวลาที่	ปริมาณกรอง	เกลือที่เหลือทิ้ง (mg/Lon2/m ² h)	ค่าความดันตกคร่อม	ความเข้มข้นเกลือตก (g/l)	% รีไซเคิล
0.5	0.25	92.5	1.8137			
1	0.75	56.5	1.1078			
1.5	1.25	45	0.8824			
2	1.75	37	0.7255			
3	2.5	62	0.6078	0.031	0.026	99.740
4	3.5	52	0.6098			
5	4.5	46.5	0.4559			
6	5.5	41	0.4020			
8	7	70	0.3431			
10	9	58	0.2843	0.031	0.026	99.740
12	11	48	0.2353			
14	13	40	0.1961			
18	15	33.5	0.1642			
18	17	29	0.1422			
20	19	24	0.1176			
25	22.5	48	0.0902			
30	27.5	33	0.0647	0.032	0.027	99.732
35	32.5	28	0.0549			
40	37.5	24.5	0.0480			
45	42.5	22	0.0431			
50	47.5	20	0.0392			
55	52.5	19	0.0373			
60	57.5	18	0.0353			
85	82.5	17.5	0.0343			
70	87.5	17	0.0333	0.027	0.023	99.773
75	72.5	16.5	0.0324			
80	77.5	16.5	0.0324			
85	82.5	16	0.0314			
90	87.5	15.5	0.0304	0.026	0.022	99.762
95	92.5	15	0.0294			
100	97.5	14.5	0.0284			
105	102.5	14	0.0275			
110	107.5	13.5	0.0265			
115	112.5	13.5	0.0265			
120	117.5	13.5	0.0265			
125	122.5	13	0.0255			
130	127.5	13	0.0255	0.028	0.023	99.765
135	132.5	13	0.0255			
140	137.5	12.75	0.0250			
145	142.5	12.5	0.0245			
150	147.5	12.5	0.0245			
155	152.5	12.5	0.0245			
160	157.5	12.5	0.0245			



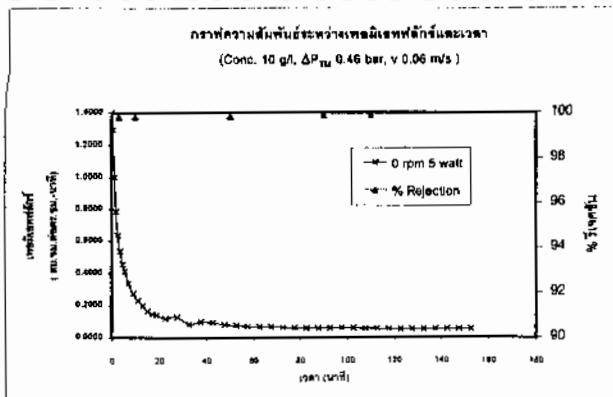
วันที่ 20/4/43
 การทดลองที่ 125

ความดันคร่อมเยื่อเมม	0.46 บาร์	จำนวนพลาสมาลิวเซฟ	1 ตัว
ความเร็วของเยื่อเมม	0.06 เมตรต่อนาที	ความเค็มของน้ำเกลือ	26 กรัมลิตร
ความเข้มข้น	10 กรัมลิตร	ค่าวัดความเค็มของน้ำ	5 กรัม
ความเร็วของหมุน	0 รอบต่อนาที		

ค่าความต้านทานของ

permeate pure water (membrane)	4.70 ml/s	$R_m =$	$1.2907E+09$ 1/cm	
permeate pure water (membrane+fouling+cake)	0.11 ml/s	$R_f =$	$6.6673E+10$ 1/cm	$R_f = 6.5545E+10$ 1/cm
permeate pure water (membrane+fouling)	4.57 ml/s	$R_f + R_m =$	$1.3284E+09$ 1/cm	$R_f = 3.7896E+07$ 1/cm

ช่วงเวลา (min)	น้ำหนัก (g)	ปริมาตร (ml)	เทมปีเรเจอร์ (°C)	ค่าการไหล (ml/min)	ความเข้มข้น (g/l)	ประสิทธิภาพ (%)
0.5	0.26	103	2.0190			
1	0.75	66	1.2541			
1.5	1.25	51	1.0000			
2	1.75	40	0.7843			
3	2.6	85	0.6373	0.021	0.018	98.824
4	3.5	65	0.5392			
5	4.5	48.5	0.4559			
6	5.5	42	0.4118			
8	7	69	0.3382			
10	9	56	0.2745	0.021	0.018	98.824
12	11	46.5	0.2279			
14	13	40	0.1961			
16	15	33.5	0.1642			
18	17	30	0.1471			
20	19	28	0.1373			
25	22.5	60	0.1176			
30	27.5	64	0.1255			
35	32.5	42	0.0824			
40	37.5	50	0.0980			
45	42.5	47	0.0922			
50	47.5	41	0.0804	0.018	0.015	99.849
55	52.5	39	0.0765			
60	57.5	36	0.0706			
65	62.5	35	0.0686			
70	67.5	35	0.0686			
75	72.5	33	0.0647			
80	77.5	31	0.0608			
85	82.5	30	0.0588			
90	87.5	30	0.0588	0.014	0.012	99.883
95	92.5	29	0.0569			
100	97.5	31	0.0608			
105	102.5	30	0.0588			
110	107.5	28	0.0549	0.012	0.010	99.899
115	112.5	27.5	0.0539			
120	117.5	26.5	0.0520			
125	122.5	26	0.0510			
130	127.5	26	0.0510			
135	132.5	26	0.0510			
140	137.5	27	0.0529			
145	142.5	27	0.0529			
150	147.5	27	0.0529			
155	162.5	27	0.0529			



วันที่ 20/9/43

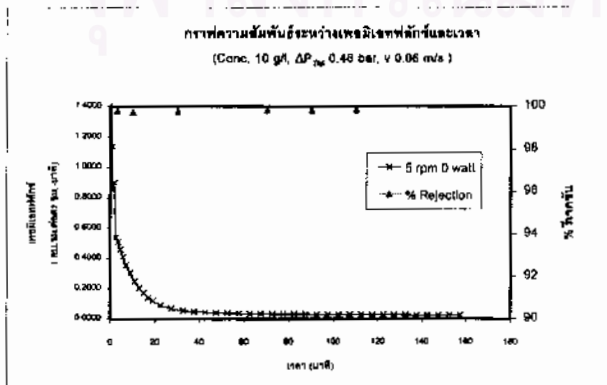
ภาพทดลองที่ 126

ความดันครอสฟลูว์	0.46 บาร์	ค่าความดันครอสฟลูว์	0 บาร์
ความเร็วไหลเวียน	0.06 เมตรต่อวินาที	ความเข้มข้นของเกลือ	0 กรัมต่อลิตร
ความเข้มข้น	10 กรัมต่อลิตร	ค่าการล้นเมมเบรน	0 ลิตร
ความถี่ไหลเวียน	5 รอบต่อนาที		

ค่าความต้านทานการกรอง

permeate pure water (membrane)	4.83 m/s	$R_m =$	$1.2551E+09$ 1/cm	
permeate pure water (membrane+fouling+cake)	0.05 m/s	$R_f =$	$1.3000E+11$ 1/cm	$R_t = 1.282E+11$ 1/cm
permeate pure water (membrane+fouling)	4.40 m/s	$R_f+R_m =$	$1.3787E+09$ 1/cm	$R_t = 1.2961E+09$ 1/cm

ระยะเวลา (min)	น้ำหนัก (กรัม)	ปริมาตร (ml)	เกลือที่ตกค้าง (กรัม/ตร.ซม.)	ค่าจากสมการ	ความเข้มข้นเกลือตก (g/l)	น้ำหนักแห้ง (%)
0.5	0.25	95	1.8827			
1	0.75	56	1.1373			
1.5	1.25	43.5	0.8529			
2	1.75	46	0.9020			
3	2.5	55	0.8382	0.025	0.021	99.790
4	3.5	52	0.5068			
5	4.5	47	0.4608			
8	6.5	42	0.4118			
8	7	73	0.3678			
10	9	62	0.3038	0.03	0.025	99.748
12	11	51	0.2500			
14	13	42	0.2059			
16	15	35.5	0.1740			
18	17	28	0.1422			
20	19	25	0.1225			
25	22.5	46.5	0.0812			
30	27.5	35	0.0666	0.026	0.022	99.782
35	32.5	26.5	0.0559			
40	37.5	25	0.0460			
45	42.5	23	0.0451			
50	47.5	20.5	0.0402			
55	52.5	19.5	0.0382			
60	57.5	16.5	0.0363			
65	62.5	17.5	0.0343			
70	67.5	17	0.0333	0.02	0.017	99.832
75	72.5	16.5	0.0324			
80	77.5	15.5	0.0304			
85	82.5	15	0.0294			
90	87.5	15	0.0284	0.019	0.016	99.841
95	92.5	14.5	0.0284			
100	97.5	14	0.0275			
105	102.5	13.5	0.0265			
110	107.5	13	0.0255	0.018	0.015	99.849
115	112.5	13	0.0255			
120	117.5	12.75	0.0250			
125	122.5	12.5	0.0245			
130	127.5	12.5	0.0245			
135	132.5	12.5	0.0245			
140	137.5	12.25	0.0240			
145	142.5	12	0.0235			
150	147.5	12	0.0235			
155	152.5	12	0.0235			
160	157.5	12	0.0235			



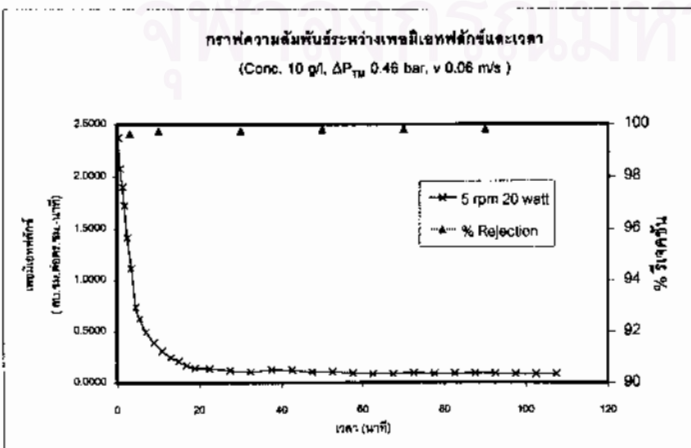
วันที่ 21/6/43
 การทดลองที่ 127

ความดันกึ่งหนึ่งเมมเบรน	0.46	บาร์	จำนวนทวนสัปดาห์	1	ตัว
ความเร็วสายเมมเบรน	0.06	เมตรต่อวินาที	ความถี่คลื่นเหนือเสียง	28	กิโลเฮิรตซ์
ความเข้มข้น	10	กรัมต่อลิตร	กำลังคลื่นเหนือเสียง	20	วัตต์
ความเร็วรอบหมุน	5	รอบต่อนาที			

ค่าความต้านทานการกรอง

permeate pure water (membrane)	4.67	ml/s	$R_m =$	1.3000E+06	1/cm		
permeate pure water (membrane+fouling+cake)	0.15	ml/s	$R_f =$	3.9564E+10	1/cm	$R_c =$	3.8185E+10
permeate pure water (membrane+fouling)	4.40	ml/s	$R_m + R_{fm} =$	1.3787E+06	1/cm	$R_{fc} =$	7.8785E+07

ช่วงเวลา (min)	เวลาที่	ปริมาตร(ml)	เพอมีเจฟลักซ์ (cm ³ /cm ² ·min)	ค่าจากสมการโดร	ความเข้มข้นเพอมีเจฟ(g/l)	% รีเจกชัน
0.5	0.25	121	2.3725			
1	0.75	106	2.0784			
1.5	1.25	97	1.8020			
2	1.75	88	1.7255			
3	2.5	144	1.4118	0.041	0.034	99.858
4	3.5	114	1.1176			
5	4.5	75	0.7353			
6	5.5	63.5	0.6225			
8	7	101	0.4951			
10	8	80	0.3922	0.029	0.024	99.757
12	11	83	0.3088			
14	13	50.5	0.2475			
16	15	43	0.2108			
18	17	35	0.1716			
20	19	30	0.1471			
25	22.5	71	0.1392			
30	27.5	62	0.1216	0.028	0.023	99.765
35	32.5	56	0.1098			
40	37.5	65	0.1275			
45	42.5	63	0.1235			
50	47.5	53	0.1039	0.022	0.018	99.815
55	52.5	53	0.1039			
60	57.5	47	0.0822			
65	62.5	45	0.0882			
70	67.5	44	0.0863	0.02	0.017	99.832
75	72.5	48	0.0981			
80	77.5	43.5	0.0853			
85	82.5	43.5	0.0853			
90	87.5	47	0.0922	0.02	0.017	99.832
95	92.5	45.5	0.0892			
100	97.5	42	0.0824			
105	102.5	43	0.0843			
110	107.5	45	0.0882			



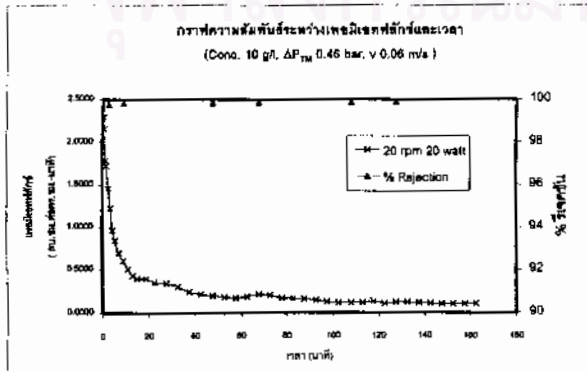
วันที่ 23/9/43
ภาคทดลองที่ 128

ความดันพองซึม	0.46 บาร์	จำนวนหน่วยปริมาตร	1 ลิตร
ความเร็วไหลป้อน	0.06 เมตร/วินาที	ความเข้มข้นของเกลือ	20 กรัม/ลิตร
ความเร็วหมุน	10 รอบ/วินาที	ค่าสัมประสิทธิ์การไหล	20 ลิตร/วินาที
ความเร็วรอบของ	20 รอบ/วินาที		

ค่าความต้านทานการไหล

permeate pure water (membrane)	4.43 m/s	$R_m =$	$1.3684E-09$ 1/cm		
permeate pure water (membrane+fouling+cake)	0.18 m/s	$R_f =$	$3.3703E+10$ 1/cm	$R_f =$	$3.1483E+10$ 1/cm
permeate pure water (membrane+fouling)	2.73 m/s	$R_f + R_m =$	$2.2194E+09$ 1/cm	$R_f =$	$8.5106E+06$ 1/cm

ช่วงเวลา (min)	น้ำหนัก (กรัม)	ปริมาณของน้ำ (ml)	ความเข้มข้นเกลือ (mg/l)	ค่าจางเกลือในถัง (mg/l)	ความเร็วหมุน (รอบ/วินาที)	ประสิทธิภาพ (%)
0.5	0.25	117	2.2941			
1	0.75	110	2.1589			
1.5	1.25	91	1.7843			
2	1.75	88	1.7255			
3	2.5	149	1.4608	0.026	0.022	99.782
4	3.5	125	1.2265			
5	4.5	98	0.9608			
6	5.5	86	0.8431			
8	7	142	0.8961			
10	8	124	0.8076	0.021	0.018	99.624
12	11	104	0.5996			
14	13	87.5	0.4289			
15	15	82	0.4020			
18	17	81	0.3971			
20	19	81	0.3971			
25	22.5	180	0.3529			
30	27.5	174	0.3412			
35	32.5	156	0.3058			
40	37.5	122	0.2382			
45	42.5	110	0.2157			
50	47.5	102	0.2000	0.017	0.014	99.857
55	52.5	93.5	0.1833			
60	57.5	86	0.1726			
65	62.5	95	0.1653			
70	67.5	106	0.2078	0.016	0.013	99.866
75	72.5	104	0.2039			
80	77.5	86	0.1687			
85	82.5	86	0.1687			
90	87.5	81.5	0.1598			
95	92.5	73	0.1431			
100	97.5	64	0.1255			
105	102.5	60	0.1176			
111	108	70	0.1144	0.012	0.010	99.899
115	113	47.5	0.1184			
120	117.5	66.5	0.1304			
125	122.5	53	0.1039			
130	127.5	62	0.1215	0.014	0.012	99.883
135	132.5	51	0.1196			
140	137.5	59	0.1157			
145	142.5	56	0.1098			
150	147.5	53	0.1039			
155	152.5	53.5	0.1049			
160	157.5	53	0.1039			
165	162.5	53	0.1039			



วันที่ 23/04/3

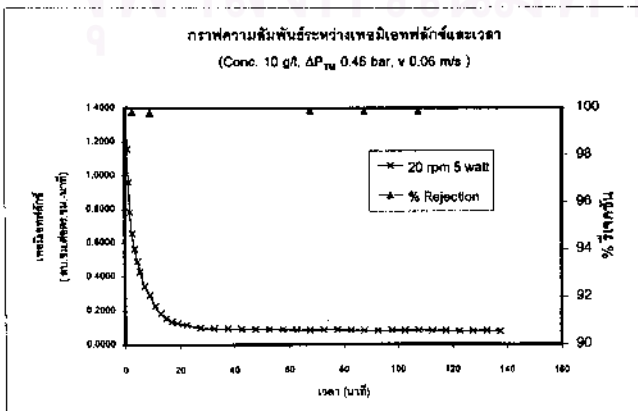
การทดลองที่ 129

ความเข้มข้นเยื่อเมม	0.48	บาร์	จำนวนทรานส์เมม	1	ตัว
ความเข้มข้นป้อน	0.08	แอมพลูโมลลิ	ความเข้มข้นเกลือ	28	มิลลิกรัม
ความเข้มข้น	10	กิโลดัลตัน	กำลังคั้นเหนียว	5	วัตต์
ความเร็วรอบหมุน	20	รอบต่อนาที			

ค่าความต้านทานการกรอง

permeate pure water (membrane)	5.73	n/s	$R_m =$	$1.0581E+09$	1/cm	
permeate pure water (membrane+fouling+cake)	0.15	n/s	$R_f =$	$3.9699E+10$	1/cm	$R = 3.9010E+10$
permeate pure water (membrane+fouling)	6.13	n/s	$R_p + R_m =$	$8.8910E+06$	1/cm	$R_p = 8.9007E+07$

ช่วงเวลา (นาที)	น้ำหนัก (กรัม)	ปริมาตร (ml)	เทมโพรเชฟลักซ์ (cm ³ /cm ² /min)	ค่าจากสมการ	ความเข้มข้นเทมโพร (g/l)	% รีเจกชัน
0.5	0.25	110	2.1569			
1	0.75	59	1.1569			
1.5	1.25	49	0.9608			
2	1.75	40	0.7843			
3	2.5	67	0.6560	0.016	0.015	99.849
4	3.5	57.5	0.5637			
5	4.5	50	0.4902			
6	5.5	44	0.4314			
8	7	71	0.3480			
10	9	60	0.2941	0.022	0.018	99.816
12	11	47	0.2304			
14	13	38	0.1863			
16	15	32	0.1569			
18	17	28	0.1373			
20	19	26	0.1275			
25	22.5	60	0.1176			
30	27.5	51	0.1000			
35	32.5	49.5	0.0971			
40	37.5	46.5	0.0951			
45	42.5	46	0.0941			
50	47.5	47	0.0922			
55	52.5	47	0.0922			
60	57.5	45.5	0.0892			
65	62.5	44	0.0863			
70	67.5	43	0.0843	0.012	0.010	99.899
75	72.5	44	0.0863			
80	77.5	43.5	0.0853			
85	82.5	42.5	0.0833			
90	87.5	42	0.0824	0.013	0.011	99.891
95	92.5	41	0.0804			
100	97.5	41.5	0.0814			
105	102.5	42	0.0824			
110	107.5	42	0.0824	0.014	0.012	99.883
115	112.5	41	0.0804			
120	117.5	40.5	0.0794			
125	122.5	40	0.0784			
130	127.5	40.5	0.0794			
135	132.5	40.5	0.0794			
140	137.5	40	0.0784			



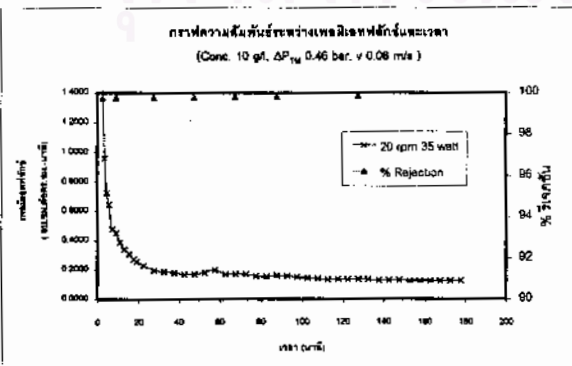
วันที่ 25/9/43
ภาคเรียนที่ 130

ความดันที่เริ่มระบบ	0.48 บาร์	จำนวนสายเคเบิล	1	ตัว
ความนำที่ขุ่นก่อน	0.06 หน่วยฟลูอิด	ความนำที่ขุ่นหลังกรอง	28	ฟลูอิด
ความนำที่ขุ่น	10 หน่วยฟลูอิด	ค่ารีเจกชันเฉลี่ย	25	ตัว
ความนำที่ขุ่นต่อ	20 หน่วยฟลูอิด			

ค่าความต้านทานการกรอง

permeate pure water (membrane)	5.33	ml/s	$R_m =$	$1.1375E+09$	1/cm	
permeate pure water (membrane+fouling+cake)	0.21	ml/s	$R_f =$	$2.8437E+10$	1/cm	$R_p = 2.7108E+10$ 1/cm
permeate pure water (membrane+fouling)	4.57	ml/s	$R_m+R_f =$	$1.3264E+09$	1/cm	$R_p = 1.9008E+08$ 1/cm

ช่วงเวลา (min)	เวลาที่	ปริมาณ(ml)	ผลผลิตสุทธิ (cm ³ /min)	ค่าความนำที่ขุ่น	ความเข้มข้น (mg/l)	รีเจกชัน (%)
0.5	0.25	143	2.9029			
1	0.75	120	2.3529			
1.5	1.25	107	2.0990			
2	1.75	93	1.8295			
3	2.5	148	1.4314	0.028	0.023	99.785
4	3.5	98	0.9808			
5	4.5	74	0.7255			
6	5.5	56	0.8471			
8	7	98	0.4804			
10	9	99	0.4559	0.028	0.023	99.785
12	11	79	0.3873			
14	13	89	0.3382			
17	15.5	65	0.3105			
18	17.5	28	0.2745			
20	19	52	0.2549			
26	22.5	118	0.2314			
30	27.5	101	0.1990	0.028	0.023	99.785
35	32.5	96	0.1882			
40	37.5	82	0.1809			
45	42.5	87	0.1705			
50	47.5	87	0.1705	0.026	0.022	99.782
55	52.5	93	0.1824			
60	57.5	102	0.2090			
65	62.5	88	0.1725			
70	67.5	88	0.1725	0.022	0.018	99.815
75	72.5	87	0.1708			
80	77.5	81	0.1588			
85	82.5	78	0.1529			
90	87.5	82	0.1608	0.021	0.015	99.824
95	92.5	61	0.1583			
100	97.5	77	0.1510			
106	102.5	73.5	0.1441			
110	107.5	71	0.1392			
115	112.5	68	0.1333			
120	117.5	70	0.1373			
125	122.5	68	0.1333			
130	127.5	69	0.1353	0.015	0.013	99.874
136	132.5	58.5	0.1343			
140	137.5	55	0.1275			
145	142.5	57	0.1314			
150	147.5	57	0.1314			
155	152.5	64.5	0.1265			
160	157.5	64	0.1265			
165	162.5	64	0.1255			
170	167.5	64.5	0.1265			
175	172.5	62	0.1216			
180	177.5	64	0.1255			



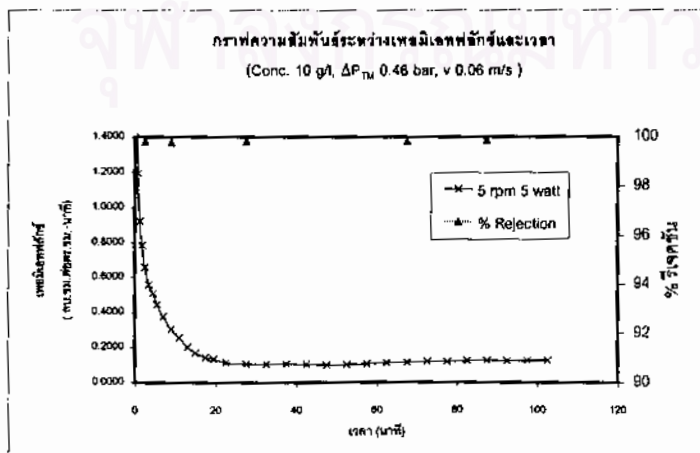
วันที่ 26/9/43
การทดลองที่ 131

ความดันคร่อมเยื่อเมม	0.46	บาร์	จำนวนทวนศิวเรฟ	1	ตัว
ความเร็วสายป้อน	0.06	เมตรต่อวินาที	ความถี่คลื่นเหนือเสียง	20	กิโลเฮิรตซ์
ความเข้มข้น	10	กรัมต่อลิตร	กำลังคลื่นเหนือเสียง	5	วัตต์
ความเร็วรอบหมุน	5	รอบต่อนาที			

ค่าความต้านทานการกรอง

permeate pure water (membrane)	2.97	ml/s	$R_m =$	2.0449E+09	1/cm	
permeate pure water (membrane+fouling+cak)	0.35	ml/s	$R_f =$	1.7499E+10	1/cm	$R_p = 1.6382E+10$ 1/cm
permeate pure water (membrane+fouling)	5.33	ml/s	$R_p + R_m =$	1.1375E+09	1/cm	$R_p = -9.0742E+08$ 1/cm

ช่วงเวลา (min)	เวลาที่	ปริมาตร(ml)	เพอมีเลตฟลักซ์ (cm ³ /cm ² ·min)	ค่าจากแบบจำลอง	ความเข้มข้นเพอมีเลต(g/l)	% รีเจกชัน
0.5	0.25	107	2.0980			
1	0.75	61	1.1961			
1.5	1.25	47	0.9216			
2	1.75	40	0.7843			
3	2.5	67	0.6569	0.02	0.017	99.832
4	3.5	57	0.5588			
5	4.5	52	0.5098			
6	5.5	45.5	0.4461			
8	7	77	0.3775			
10	8	62	0.3039	0.025	0.021	99.790
12	11	52.5	0.2574			
14	13	41.5	0.2034			
16	15	35	0.1716			
19	17.5	44	0.1438			
20	18.5	14	0.1373			
26	22.5	58.5	0.1147			
30	27.5	55	0.1078	0.019	0.016	99.841
35	32.5	54	0.1059			
40	37.5	54.5	0.1069			
45	42.5	53	0.1039			
50	47.5	51.5	0.1010			
55	52.5	52	0.1020			
60	57.5	54	0.1059			
65	62.5	56	0.1137			
70	67.5	59	0.1157	0.019	0.016	99.841
75	72.5	61	0.1186			
80	77.5	61.5	0.1208			
85	82.5	63	0.1235			
90	87.5	65	0.1275	0.014	0.012	99.883
95	92.5	63	0.1235			
100	97.5	64	0.1255			
105	102.5	65	0.1275			



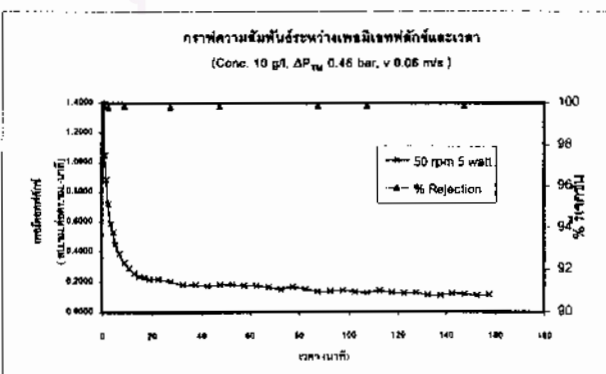
วันที่ 26/9/43
 ภาพทดลองที่ 132

ความดันคอมเพรสเซอร์	0.46 บาร์	จำนวนทวนเคียว	1 ตัว
ความถี่สายป้อน	0.06 เมตริกซ์วินาที	ความถี่คลื่นบนท่อป้อน	26 กิโลเฮิรตซ์
ความเร็วเส้น	10 กรัมต่อวินาที	กำลังที่ให้น้ำป้อน	5 วัตต์
ความเร็วรอบหมุน	50 รอบต่อนาที		

ค่าความต้านทานการไหล

permeate pure water (membrane)	6.23 ml/s	$R_m =$	$0.7323E+08$ 1/cm	
permeate pure water (membrane+fouling+cake)	0.37 ml/s	$R_f =$	$1.6545E+10$ 1/cm	$R_c = 1.5407E+10$ 1/cm
permeate pure water (membrane+fouling)	5.33 ml/s	$R_f + R_m =$	$1.1376E+09$ 1/cm	$R_c = 1.6423E+08$ 1/cm

ช่วงเวลา (min)	น้ำหนัก (g)	ปริมาตร (ml)	เฟรมิลิตเรต (ml/min)	ค่าการปนเปื้อน	ความเข้มข้นเฟรมิลิตเรต (g/l)	น้ำหนัก
0.5	0.25	120	2.3629			
1	0.75	70.5	1.3824			
1.5	1.26	63.5	1.0490			
2	1.75	45	0.8624			
3	2.6	73.5	0.7206	0.024	0.020	99.799
4	3.5	60	0.5882			
5	4.5	54	0.5294			
6	5.5	46	0.4516			
8	7	79	0.3873			
10	8	67	0.3284	0.017	0.014	99.657
12	11	59	0.2892			
14	13	52	0.2540			
16	15	48	0.2353			
18	17	47	0.2004			
20	19	44	0.2157			
25	22.5	110	0.2157			
30	27.5	104	0.2039	0.022	0.018	99.615
35	32.5	91.5	0.1794			
40	37.5	92	0.1804			
45	42.5	88	0.1725			
50	47.5	92.5	0.1814	0.019	0.013	99.868
55	52.5	91.5	0.1794			
60	57.5	90	0.1765			
65	62.5	87	0.1708			
70	67.5	84	0.1647			
75	72.5	76	0.1490			
80	77.5	84	0.1647			
85	82.5	78	0.1490			
90	87.5	69	0.1353	0.014	0.012	99.663
95	92.5	69	0.1353			
100	97.5	72	0.1412			
105	102.5	68	0.1333			
110	107.5	65	0.1275	0.013	0.011	99.891
115	112.5	71	0.1392			
120	117.5	65	0.1275			
125	122.5	62.5	0.1229			
130	127.5	64	0.1255			
135	132.5	57	0.1118			
140	137.5	56	0.1098			
145	142.5	62	0.1216			
150	147.5	60	0.1176	0.012	0.010	99.899
155	152.5	56.5	0.1108			
160	157.5	58	0.1137			



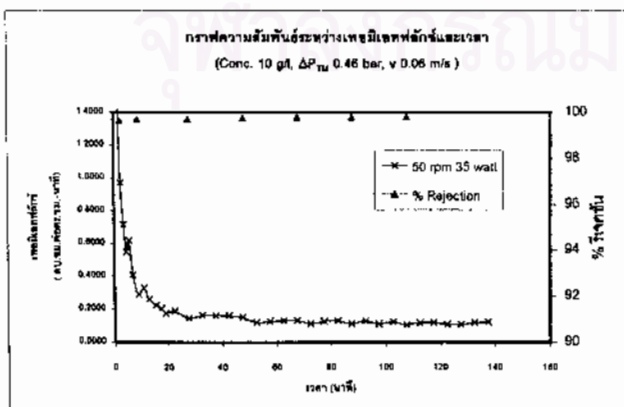
วันที่ 27/9/43

การทดลองที่ 133			
ความดันคอมเพรสเซอร์	0.46 บาร์	จำนวนรอบเครื่อง	1 ชั่วโมง
ความเร็วสายพาน	0.06 เมตรต่อวินาที	ความถี่ที่เครื่องเปิด	28 กิโลเฮิรตซ์
ความเข้มข้น	10 กรัมต่อลิตร	กำลังขับมอเตอร์	36 วัตต์
ความเร็วรอบหมุน	60 รอบต่อวินาที		

ค่าความต้านทานการกรอง

permeate pure water (membrane)	6.53	ml/s	$R_m =$	$9.2854E+08$	1/cm
permeate pure water (membrane+fouling+cake)	0.28	ml/s	$R_f =$	$2.3483E+10$	1/cm
permeate pure water (membrane+fouling)	5.47	ml/s	$R_f + R_m =$	$1.1097E+09$	1/cm
				$R_p =$	$2.2373E+10$
				$R_c =$	$1.8118E+08$

ช่วงเวลา (min)	นาฬิกา	ปริมาณสะสม(ml)	เฟล็กซ์ (ml/cm ² ·min)	ค่าจากกราฟ	ความเข้มข้นเฟล็กซ์ (g/l)	% รีเจกชัน
0.5	0.75	156	3.0588			
1	0.75	130	2.5480			
1.5	1.25	117	2.2841			
2	1.75	72	1.4118			
3	2.5	99	0.9706	0.044	0.037	99.831
4	3.5	73	0.7157			
5	4.5	56	0.6490			
8	5.5	63	0.6178			
8	7	83	0.4069			
10	9	59	0.2892	0.037	0.031	99.890
12	11	67	0.3284			
14	13	53	0.2598			
17	16.5	88	0.2222			
18	17.5	21	0.2059			
20	19	35	0.1718			
25	22.5	96	0.1852			
30	27.5	74	0.1451	0.035	0.028	99.706
35	32.5	62.5	0.1618			
40	37.5	83	0.1627			
45	42.5	82	0.1808			
50	47.5	77	0.1510	0.029	0.024	99.757
55	52.5	61	0.1198			
60	57.5	65	0.1275			
65	62.5	67	0.1314			
70	67.5	68	0.1333	0.023	0.019	99.807
75	72.5	57	0.1118			
80	77.5	65	0.1275			
85	82.5	66	0.1294			
90	87.5	57	0.1118	0.023	0.019	99.807
95	92.5	56	0.1294			
100	97.5	58	0.1098			
105	102.5	62	0.1216			
110	107.5	54	0.1059	0.021	0.018	99.824
115	112.6	60	0.1176			
120	117.5	60	0.1176			
125	122.5	55	0.1078			
130	127.6	54.5	0.1069			
135	132.5	60	0.1176			
140	137.6	62	0.1216			



วันที่ 28/9/43

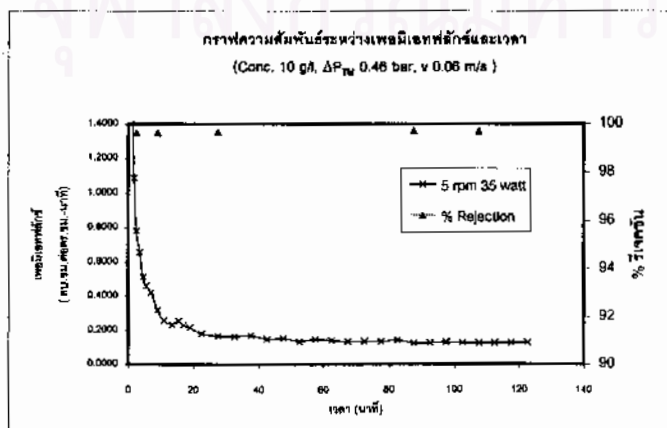
ภาวทดลองที่ 134

ความดันคร่อมเมมเบรน	0.46 บาร์	จำนวนความเคียวเซอร์	1 ตัว
ความเร็วไหลบ่อกวน	0.06 เมตรต่อวินาที	ความเข้มข้นของเกลือ	20 กรัมต่อลิตร
ความเข้มข้น	10 กรัมต่อลิตร	กำลังขับมอเตอร์	35 วัตต์
ความเร็วรอบหมุน	5 รอบต่อนาที		

ค่าความต้านทานการกรอง

permeate pure water (membrane)	5.27 ml/s	$R_m =$	1.1519E+09 1/cm	
permeate pure water (membrane+fouling+cake)	0.22 ml/s	$R_f =$	2.7299E+10 1/cm	$R_f = 2.5899E+10 1/cm$
permeate pure water (membrane+fouling)	4.33 ml/s	$R_f + R_m =$	1.4000E+09 1/cm	$R_f = 2.4809E+08 1/cm$

ช่วงเวลา (นาที)	เวลาที่	ปริมาตร(ml)	เกลือที่สกัดได้ (cm ³ cm ² /min)	ค่าจลนศาสตร์	ความเข้มข้นเกลือในฟลูอิด (g/l)	% รีเจกชัน
0.5	0.25	125	2.4510			
1	0.75	104	2.0392			
1.5	1.25	79	1.5490			
2	1.75	55.5	1.0862			
3	2.5	80	0.7843	0.042	0.035	99.848
4	3.5	87	0.6589			
5	4.5	52.5	0.5147			
6	5.5	47	0.4608			
8	7	86	0.4216			
10	9	65	0.3186	0.042	0.035	99.848
12	11	53	0.2596			
15	13.5	72	0.2353			
16	15.5	28	0.2549			
18	17	47	0.2304			
20	19	44	0.2157			
25	22.5	93	0.1824			
30	27.5	85	0.1667	0.039	0.033	88.673
35	32.5	83	0.1627			
40	37.5	87	0.1705			
45	42.5	76.5	0.1500			
50	47.5	79	0.1548			
55	52.5	69	0.1353			
60	57.5	76	0.1490			
65	62.5	72	0.1412			
70	67.5	69	0.1353			
75	72.5	70	0.1373			
80	77.5	68	0.1333			
85	82.5	73	0.1431			
90	87.5	64	0.1255	0.03	0.025	99.748
95	92.5	64	0.1255			
100	97.5	67	0.1314			
105	102.5	65	0.1275			
110	107.5	64	0.1255	0.032	0.027	99.732
115	112.5	64.5	0.1265			
120	117.5	65.5	0.1284			
125	122.5	65.5	0.1284			



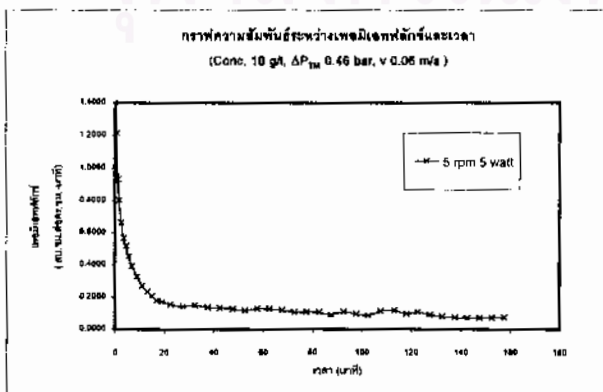
วันที่ 29/9/43
 การทดลองที่ 135

ความดันของน้ำประปา	0.46 บาร์	จำนวนรอบต่อวินาที	1	ตัว
ความเข้มข้นของโปรตีน	0.06 กรัมต่อลิตร	ความดันของน้ำประปา	28	กิโลเมตร
ความเข้มข้น	10 กรัมต่อลิตร	ค่าคงที่ของฟลูอิด	5	วินาที
ความถี่รอบหมุน	5 รอบต่อวินาที			

ค่าความต้านทานการกรอง

permeate pure water (membrane)	5.93	m/s	$R_m =$	$1.0224E+09$	1/cm
permeate pure water (membrane+fouling cake)	0.12	m/s	$R_f =$	$4.9186E+10$	1/cm
permeate pure water (membrane+fouling)	4.80	m/s	$R_m + R_{f0} =$	$1.2639E+09$	1/cm

ช่วงเวลา (นาที)	เวลาที่	ปริมาณสะสม(มล)	เฟรมลิตเซอร์ (cm ³ /cm ² /min)	ค่าการตกตะกอน	ความเข้มข้นเฟรมลิตเซอร์	ร้อยละ
0.5	0.25	108	2.1176			
1	0.75	82	1.2167			
1.5	1.25	47.5	0.9314			
2	1.75	41	0.6039			
3	2.5	88	0.6697			
4	3.5	56	0.5666			
5	4.5	53	0.5198			
6	5.5	46.5	0.4369			
8	7	80	0.3922			
10	9	67	0.3284			
12	11	56	0.2745			
14	13	48	0.2353			
16	15	43	0.2103			
18	17	37	0.1814			
20	19	35	0.1716			
26	22.5	79	0.1549			
30	27.5	73	0.1431			
35	32.5	77	0.1510			
40	37.5	70	0.1373			
45	42.5	69	0.1353			
50	47.5	66	0.1294			
55	52.5	60	0.1176			
60	57.5	66	0.1294			
65	62.5	66	0.1275			
70	67.5	62	0.1216			
75	72.5	55	0.1078			
80	77.5	56	0.1098			
85	82.5	55	0.1078			
90	87.5	47	0.0922			
95	92.5	56.5	0.1106			
100	97.5	49	0.0981			
105	102.5	44	0.0863			
110	107.5	57.5	0.1127			
116	113	71	0.1180			
120	118	38.5	0.0906			
125	122.5	55	0.1078			
130	127.5	47	0.0922			
135	132.5	40	0.0784			
140	137.5	37	0.0725			
145	142.5	36	0.0706			
150	147.5	36	0.0706			
155	152.5	36	0.0706			
160	157.5	37	0.0725			



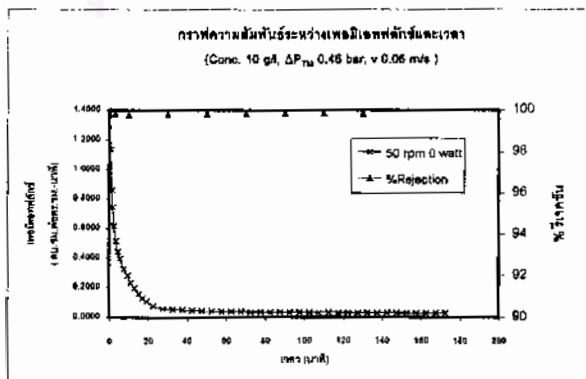
วันที่ 16/9/43
 ภาควิชาคหกรรมศาสตร์ 123

ความเข้มข้นเริ่มต้น	0.46	กรัม	จำนวนหน่วยเยื่อ	0	ตัว
ความเข้มข้น	0.06	มก/ลิตร	ความเค็มในน้ำเกลือ	0	กรัม/ลิตร
ความเข้มข้น	10	กรัม/ลิตร	ค่าเค็มในน้ำเกลือ	0	กรัม
ความเข้มข้น	50	กรัม/ลิตร			

ค่าความต้านทานการไหล

permeate pure water (membrane)	4.27	ml/s	$R_m =$	$1.4218E+09$	1/cm	
permeate pure water (membrane + fouling - cake)	0.05	ml/s	$R_f =$	$1.2551E+11$	1/cm	
permeate pure water (membrane + fouling)	4.13	ml/s	$R_f + R_m =$	$1.4677E+09$	1/cm	
				$R_m =$	$4.5866E+07$	1/cm

ช่วงเวลา (นาที)	น้ำหนัก (กรัม)	ปริมาตร (ml)	เกลือที่เหลือ (mg/cm ² ·min)	ค่าการไหล (l/h)	ความเข้มข้นเกลือ (g/l)	ร้อยละ
0.5	0.25	82	1.8078			
1	0.75	58	1.1373			
1.5	1.25	44	0.8527			
2	1.75	38	0.7451			
3	2.5	63	0.8176	0.021	0.018	99.824
4	3.5	52.5	0.5147			
5	4.5	45.5	0.4461			
6	5.5	40.5	0.3971			
9	7.5	100	0.3268			
10	9.5	29	0.2843	0.025	0.022	99.782
12	11	48	0.2353			
14	13	40	0.1961			
16	15	32.5	0.1593			
18	17	26	0.1275			
20	19	22	0.1078			
25	22.5	39	0.0756			
30	27.5	30	0.0588	0.024	0.020	99.799
35	32.5	27	0.0529			
40	37.5	25	0.0490			
45	42.5	22.5	0.0441			
50	47.5	22	0.0431	0.024	0.020	99.799
55	52.5	21	0.0412			
60	57.5	20	0.0392			
65	62.5	19.5	0.0382			
70	67.5	18.75	0.0368	0.02	0.017	99.832
75	72.5	18	0.0353			
80	77.5	17.5	0.0343			
85	82.5	17.5	0.0343			
90	87.5	17	0.0333	0.019	0.016	99.841
95	92.5	17	0.0333			
100	97.5	16	0.0314			
105	102.5	16	0.0314			
110	107.5	15.75	0.0309	0.019	0.016	99.841
115	112.5	16	0.0314			
120	117.5	15.5	0.0304			
125	122.5	15	0.0294			
130	127.5	14.5	0.0284	0.021	0.018	99.824
135	132.5	14.5	0.0284			
140	137.5	14	0.0275			
145	142.5	14	0.0275			
150	147.5	14	0.0275			
155	152.5	13.75	0.0270			
160	157.5	13.75	0.0270			
165	162.5	13.75	0.0270			
170	167.5	13.75	0.0270			
175	172.5	13.75	0.0270			



ประวัติผู้วิจัย

นางสาวพชรพรรณ จรุงรัตน์ เกิดเมื่อวันที่ 28 มกราคม พ.ศ. 2519 ภูมิลำเนาเดิมอยู่อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิตจากภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ.2539 หลังจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2540



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย